CURCUMINA, ¿UNA ESPECIA SANADORA? • LASERES DE SILICIO

INVESTIGACION y CIENCIA



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

EL UNIVERSO INVISIBLE



METANO, PLANTAS Y CAMBIO CLIMATICO

LOS ANCESTROS DE LOS VIKINGOS

EVOLUCION DE LOS LEPIDOSAURIOS

FORMACION DE CRISTALES DE NIEVE



ABRIL 2007
6,00 EUROS



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Abril de 2007

Número 367



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
VdS Comunicación
Julia Domínguez
Dr. Fleming, 56 - 3.º dcha.
28036 Madrid
Tel. y fax 913 591 965
Móvil 649 879 433

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *La mano invisible del universo*; Carlos Lorenzo: *Yacimientos fosilíferos de Madagascar*; Víctor Alonso Alonso: *La formación de cristales de nieve*; Pablo Moreno: *Láseres de silicio*; Luis Bou: *Curcumina, ¿una especia sanadora?*; José Manuel García de la Mora: *Los ancestros de los vikingos*; Margarita Segura y Javier de Mendoza: *Lego molecular*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; M.ª Rosa Vallés: *Ciencia y gastronomía*



Portada: Ken Brown

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

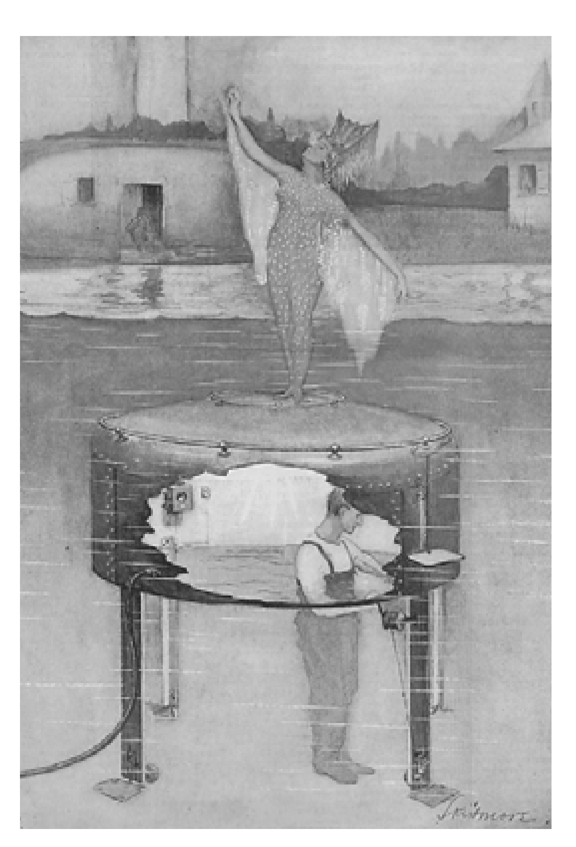
INJERTOS. «Descubrimos que podía anularse la posibilidad de desarrollar una reacción contra los homoinjertos si al animal en edad temprana se le inyectaban células del linaje donante; las más adecuadas, las del bazo. En los ratones adultos la inyección de esas células aumenta el rechazo del animal a los injertos procedentes de un donante. Pero si a un ratón en estado fetal, o a poco de nacer, se le inyectan células de bazo, ocurre lo contrario: el ratón se torna tolerante ante los injertos del linaje que suministró las células de bazo, aunque sigue rechazando los homoinjertos procedentes de ratones de otros linajes. —P. B. Medawar» [*Nota de la redacción: Medawar compartió el premio Nobel de fisiología o medicina por su trabajo sobre la adquisición de tolerancia inmunitaria.*]

EL FINAL DE LA PARIDAD. «Había dos mesones, tau y zeta. Tau, con el tiempo, se desintegraba en tres mesones pi; zeta, en dos mesones pi. Lo desconcertante era que tau y zeta eran gemelos idénticos en todo, salvo en el modo de desintegración. ¿Podría tratarse de una misma partícula? La desintegración de una partícula según dos modos distintos lo permitían la teoría y los precedentes, pero en este caso se interponía el principio de conservación de la paridad. Tsung Dao Leng, de la Universidad de Columbia, y Chen Ning Yang, del Instituto de Estudios Avanzados, se enfrentaron audazmente a una desconcertante e insistente posibilidad: simplemente, que acaso la ley de conservación de la paridad no se cumpliese para la desintegración de partículas como tau y zeta. —Philip Morrison» [*Nota de la redacción: Lee y Yang ganaron el premio Nobel de física de 1957 por ese trabajo.*]

...cien años

PREMIOS AL VUELO. «Pese al hecho de que numerosos inventores en todo Estados Unidos están pugnando con el problema de la navegación aérea en una auténtica máquina voladora dinámica, es decir, en una máquina más pesada que el aire, hasta este momento no se ha efectuado en nuestro país ningún vuelo público en una tal máquina. El conocimiento más avanzado de la navegación más-pesada-que-el-aire parece estar en posesión de dos jóvenes experimentadores del oeste [los hermanos Wright], de quienes tanto se ha escrito. Siendo SCIENTIFIC AMERICAN la publicación más antigua de este país especializada en Ciencias y Artes, creen sus propietarios que es apropiado que sea nuestra revista la primera en estimular el desarrollo de la última de las más grandes invenciones y, por tanto, ha decidido ofrecer un trofeo de gran valor en la competencia por las máquinas más-pesadas-que-el-aire: el trofeo Aeronáutico Scientific American.»

ILUSIONES ACUÁTICAS. «'La Hija de Neptuno', un fasto operístico romántico, depende por completo de la gran cisterna del Teatro Hipódromo de Nueva York para la famosa escena de las sirenas. Resulta difícil calificar esta atracción de ilusión o de efecto; es de veras muy real, pues las sirenas aparecen en la superficie y se sumergen a voluntad. Tan ingenioso acto escénico es invención de H. L. Bowdoin, de la ciudad de Nueva York, que concibió la idea aprovechando el principio de la campana de buzo. En el Hipódromo se emplean campanas de buzo individuales. Cada una es atendida por un operario, que sube o baja un pequeño ascensor sujeto al exterior de la cámara y que además ayuda a la sirena a retornar a la cámara de aire tras la representación (*véase la ilustración*). Ropa interior de caucho protege del frío a las sirenas.»



La técnica al servicio de las sirenas: Efectos especiales para una ópera acuática, 1907

...ciento cincuenta años

ENFERMEDADES ACOSADAS. «La aparición de la fiebre amarilla en la guarnición de la Isla del Gobernador, puerto de Nueva York, se atribuye a la llegada de soldados, licenciados por enfermedad, procedentes de los efectivos de Florida. La enfermedad y muerte de su compañero de Morris Island parece confirmarlo y muestra que la imposición de la ley de cuarentena excluyó de la ciudad al menos un caso; y tenemos todas las razones para creer que, si fue capaz de excluir un foco morboso, lo será de excluir muchos. Los comerciantes, así como los ciudadanos, reconocerán las virtudes de unas leyes de cuarentena bien reguladas y rigurosamente aplicadas.»

CALENTAMIENTO GLOBAL

Un informe cauteloso, quizá demasiado



El primer resumen del cuarto informe del IPCC calcula el aumento del nivel de los mares sin tener en cuenta “cambios dinámicos rápidos del flujo de hielo en el futuro”

Los científicos y diplomáticos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) publicaron en febrero un informe para gestores, resumen de la contribución del Grupo de Trabajo I, que califica de “inequívoca” la existencia del calentamiento global, pero omite toda referencia a que tienda a acelerarse. Se trata de un cauteloso documento que quizá subestime los cambios que el calentamiento causará en el mundo, más o menos tal como ya hizo el informe de 2001. Más de 2000 científicos de 154 países participaron en los trabajos del IPCC. Este primer informe examina sólo la física del cambio climático. Los autores principales se reunieron en París para revisar el documento final palabra por palabra, cambiando un énfasis aquí (“inequívoco” triunfó sobre “evidente”) u omitiendo allá alguna conclusión polémica. Por ejemplo, tras las objeciones de Arabia Saudí y China, se suprimió una frase que afirmaba que la repercusión de la actividad humana en el equilibrio térmico de la Tierra quintuplica la del Sol, cuando en realidad la decuplica, según uno de los autores principales, Piers Forster, de la Universidad de Leeds. Comparado con su aporte energético histórico, el Sol contribuye hoy sólo con 0,12 watt más por metro cuadrado, mientras que los focos de origen humano atrapan 1,6 watt adicionales por metro cuadrado. Los modelos predicen una elevación del nivel del mar de sólo 18 centímetros o de hasta 59 centímetros, según las circunstancias sociales que se supongan. Pero los modelistas del clima no pueden incluir todos los efectos sobre el hielo de tierra firme de la Antártida y Groenlandia, pues no les es posible reducirlos a fórmulas que expresen que una cantidad *x* de calor adicional equivale a una cuantía *y* de fusión. Los glaciares de Groenlandia se están fundiendo y desplazando más deprisa por término medio, pero esos cambios no siguen una tendencia creciente lineal y sencilla. Por ejemplo, el glaciar de Kundgerdlussuaq ha perdido masa por fusión; así adelgazado, dispone de menos peso para acelerar el flujo de su hielo hacia el mar. EL IPCC publica este mes su segundo informe, que se centra en las repercusiones del calentamiento global, desde la agudización de las sequías a aguaceros más intensos. El tercer informe —que se espera para mayo— tratará de su mitigación.

—David Biello

PAUL SOUDERS *Corbis* (*arriba*); MICHAEL ROSENFELD *Getty Images* (*abajo*)

MEDICINA

Efectos hormonales de la lavanda

Podría ser que la lavanda y otras esencias aromáticas provocaran en los niños el crecimiento de mamas. Clifford Bloch, pediatra endocrinólogo de la Universidad de Colorado en Denver, diagnosticó en tres niños, por lo demás sanos, de cuatro, siete y diez años ginecomastia prepuberal, rara afección que provoca el desarrollo de mamas en los varones prepúberes. Todos ellos habían empleado jabones y lociones para la piel aromatizados con lavanda, o champús para el cabello que contenían esencias de lavanda o de árbol del té. La ginecomastia remitió unos meses después de que los muchachos dejaran de usar esos productos. En el Instituto Nacional de Ciencias Ambientales de la Salud se sometieron las esencias a estudios de expresión génica en células humanas de cáncer de mama cultivadas en laboratorio. Descubrieron que podían remedar a los estrógenos, las hormonas primarias femeninas, e inhibir a los andrógenos, las hormonas primarias masculinas. Se desconoce si esas esencias tienen los mismos efectos en las niñas prepúberes, en los adolescentes y en los adultos.

—Charles Q. Choi

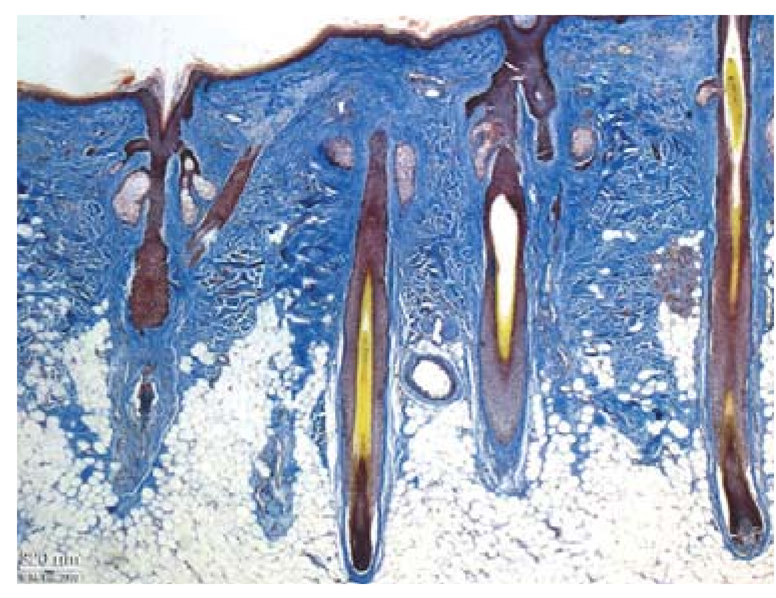


FISIOLOGIA

¿Por qué crecen los cabellos cortados?

Cortar los cabellos a ras de la superficie de la piel no afecta a su crecimiento porque el cabello que hay por encima de esa superficie está muerto. El cabello visible crece de los folículos capilares vivos, que están dentro de la piel. Los folículos experimentan un ciclo que consta de tres fases: crecimiento, degeneración y reposo, respectivamente llamadas anagenia, catagenia y telogenia. Durante la anagenia, la rápida proliferación de células en la base del folículo, o bulbo, da por resultado la producción constante de una fibra capilar que emerge de la superficie de la piel. (Los folículos producen pelos de distintas longitudes según el tiempo que permanezcan en anagenia.) Al final de la anagenia, las células productoras de los cabellos empiezan a morir; entran en la etapa de catagenia. El folículo, tras un período de dos o tres semanas en que se va secando, permanece en reposo durante varias semanas, incluso meses; es la fase de telogenia. Se regenera entonces un nuevo folículo, a partir de células madre existentes en el folículo en telogenia, y se reinicia la anagenia. La vieja fibra capilar se desprende —a menudo cuando nos cepillamos el cabello— y una nueva hebra lo sustituye. Los cabellos que parecen “saber” que deben crecer tras el corte son los que se hallaban casualmente en la fase de anagenia cuando el barbero pasó las tijeras.

—George Cotsarelis
Universidad de Pennsylvania



Folículos pilosos en la piel

ASTROFISICA

Demasiado largo y demasiado corto

Los estallidos de rayos gamma se dividen en dos grupos, según su duración: menos o más de dos segundos. Los más largos ocurren cuando una estrella joven y de mucha masa se transforma en supernova y deja tras de sí un agujero negro. Se producen los pulsos cortos cuando una estrella vieja de neutrones se precipita en espiral hacia un agujero negro. Ambos tipos difieren también en el tipo e intensidad de la energía liberada. Pero GRB60614, detectado en junio pasado, no encaja ni en uno ni en otro tipo. Por su duración de 192 segundos pertenecería a la variedad más larga, pero por la intensidad de sus emisiones se ajusta mucho mejor a la corta. Parece que se tratase de un tipo novedoso de explosión cósmica, según Neil Gehrels, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, autor principal de uno de los cuatro artículos que describían el fenómeno en *Nature* del 21 de diciembre. Otras erupciones hacen pensar en “híbridos” similares. Una explicación posible es la creación de agujeros negros tan potentes, que no privan a las estrellas viejas de la oportunidad de convertirse en supernovas.

—David Biello

El flujo térmico en EE.UU., desde 150 (*rojo*) hasta 25 (*azul*) miliwatt por metro cuadrado, podría satisfacer la décima parte de las necesidades eléctricas del país

ENERGIA

Piedras calientes

Las centrales geotérmicas podrían satisfacer miles de veces las necesidades energéticas de EE.UU., según una comisión de 18 miembros auspiciada por el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Tales centrales generan electricidad con el líquido o el vapor calentado en las remotas profundidades de la Tierra. Propone la comisión construir un gran número de centrales eléctricas geotérmicas que perforen en el lecho rocoso hipertérmico, creen un depósito abierto y bombeen agua a éste para que se caliente. Se calcula que en las honduras del subsuelo estadounidense se guardan unos 13 cuatrillones (10^{24}) de joule, de los que es recuperable un 1,5 por ciento, si no se tienen en cuenta los costes. Podrían instalarse durante los próximos 40 años más de 100 gigawatt de potencia geotérmica (una décima parte de la electricidad hoy generada en EE.UU.) por mil millones de dólares, que es lo que cuesta una central térmica de carbón y un tercio de lo que cuesta una central nuclear. La dificultad: no lubricar fallas que desencadenen terremotos, como ha sucedido en Basilea.

—David Biello

UNSW Embriology - http://embryology.med.unsw.edu.au/embryo.htm (*arriba*); *THE FUTURE OF GEOTHERMAL ENERGY: IMPACT OF ENHACED GEOTHERMAL SYSTEMS (EGS) ON THE UNITED STATES IN THE 21ST CENTURY* POR JEFFERSON W. TESTER *ET AL.*, © 2006 INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE MASSACHUSETTS (*abajo*)



LA MANO INVISIBLE del universo

La energía oscura no se limita a acelerar la expansión del universo. Influye en el distanciamiento entre las galaxias y en su conformación

CHRISTOPHER J. CONSELICE

¿Qué nos ha llevado tanto tiempo? Hasta 1998 no se descubrió que nos habíamos estado perdiendo tres cuartas partes del contenido del universo, la energía obscura. Una forma desconocida de energía que nos rodea y nos arrastra con suavidad. De la energía obscura depende el destino del cosmos. Y ni lo sabíamos.

En honor a la verdad, algunos sí habían anticipado su existencia. Pero incluso ellos nos dirían que su detección se encuentra entre los descubrimientos más revolucionarios de la cosmología del siglo XX. No sólo parece que la energía oscura constituye la mayor parte del universo, sino que, además, su presencia, de resistir la prueba del tiempo, exigirá el desarrollo de nuevas teorías físicas.

Apenas se ha iniciado el largo camino que conduce al conocimiento de la naturaleza de la energía oscura y de sus consecuencias. Nos hemos percatado de que la energía oscura —descubierta por el efecto que ejerce sobre el universo en su globalidad— podría moldear la evolución de estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias. Los astrónomos han estado observando su obra durante docenas de años sin caer en la cuenta.

Curiosamente, la propia omnipresencia de la energía oscura nos la tuvo oculta. A diferencia de la materia, esa energía no se acumula en unos lugares más que en otros. Dada su naturaleza, se extiende por doquier. En cualquier lugar —sea la cocina o el espacio intergaláctico— presenta siempre la misma densidad, unos 10^{-26} kilogramos por metro cúbico, equivalente a un puñado de átomos de hidrógeno por metro cúbico. Toda la energía oscura del sistema solar apenas suma la masa de un pequeño asteroide; por eso, no condiciona el movimiento de los planetas. Sus efectos se perciben en las distancias e intervalos temporales más vastos.

Desde los días de Edwin Hubble, se sabe que todas las galaxias, excepto las más cercanas, se alejan de nosotros a un ritmo veloz, proporcional a la distancia: cuanto más lejana se halle la galaxia, con mayor celeridad se alejará. Las galaxias no se mueven por el espacio en el sentido corriente de la palabra; las arrastra el espacio en su expansión [*véase* "Las paradojas de la gran explosión", por Charles H. Lineweaver y Tamara M. Davis; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2005]. Durante decenios, se ha intentado responder a la pregunta obvia que se desprende de esta idea: ¿cómo cambia el ritmo de expansión con el tiempo? Se creía que la expansión debería frenarse, puesto que la atracción gravitatoria ejercida entre sí por las galaxias contrarrestaría la expansión.

El primer dato observacional inequívoco de los cambios en el ritmo de expansión lo proporcionaron las supernovas remotas, explosiones de grandes estrellas que sirven de hitos de la expansión cósmica, a la ma-

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

nera en que un tronco a la deriva nos permite medir la velocidad de la corriente del río. Estas observaciones revelaron que la expansión era más lenta en el pasado que hoy; por tanto, se está acelerando. Mejor dicho: se había estado frenando, pero a partir de cierto momento se aceleró [*véase* “Exploración del espacio-tiempo mediante supernovas”, por Craig J. Hogan, Robert P. Kirshner y Nicholas B. Suntzeff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 1999, y “Cuando la aceleración cambió de signo”, por Adam G. Riess y Michael S. Turner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2004]. Diferentes estudios del fondo cósmico de microondas han confirmado desde entonces este sorprendente resultado, entre ellos el efectuado por la sonda Wilkinson de las Anisotropías en Microondas (WMAP).

Una posible explicación sería que las leyes gravitatorias en las escalas supergalácticas difieran de las que rigen en escalas inferiores, de modo que la gravedad de las galaxias no oponga resistencia a la expansión. Pero la hipótesis general más aceptada mantiene la universalidad de las leyes gravitatorias, por lo que se presupone la existencia de alguna forma de energía, totalmente desconocida, que se opone a la atracción mutua entre las galaxias y la vence; ello conlleva la separación acelerada entre galaxias. Aunque la energía oscura no presenta consecuencias dentro de nuestra galaxia (y menos en nuestra cocina), en total constituye la fuerza más poderosa del cosmos.

Escultora cósmica

A medida que se explora este nuevo fenómeno, se va descubriendo que la energía oscura, además de fijar el ritmo de expansión global del universo, tiene consecuencias a largo plazo en las escalas pequeñas. En una vista general del universo observable, vemos en primer lugar que la materia se distribuye a escala cósmica a lo largo de una estructura de telaraña, una filigrana de filamentos de decenas de millones de años-luz de largo separados por vacíos de tamaño similar. Las simulaciones demuestran que para explicar dicha configuración se requieren tanto la materia como la energía oscura.

El hallazgo no resulta sorprendente, a la postre. Los filamentos y los vacíos no son cuerpos consistentes, como los planetas. No se han apartado de la expansión cósmica global; no han establecido su equilibrio interno de fuerzas. Constituyen el resultado de la competencia entre la expansión cósmica (y cualquier otro fenómeno con el mismo efecto) y su propia gravedad. En el universo actual, en la puja de ambas fuerzas ninguna se impone abrumadoramente a la otra. Si la energía oscura hubiese sido más poderosa, la expansión habría vencido; la materia se habría esparcido antes de que se concentrara en filamentos. Si hubiese sido más débil, la materia estaría más concentrada que ahora.

La situación se complica si reducimos la escala de la vista hasta la correspondiente a las galaxias y cúmulos de galaxias. Las galaxias, entre ellas la Vía Láctea, no se expanden. Su tamaño viene fijado por el equilibrio entre la gravedad y el momento angular de las estrellas, el gas y el resto del material de que se componen; crecen sólo mediante la agregación de materia del espacio intergaláctico o por la fusión con otras galaxias. La expansión cósmica tiene un efecto insignificante sobre ellas. Por tanto, no resulta evidente que la energía oscura pueda haber intervenido en la formación de las galaxias. Lo mismo vale para los cúmulos de galaxias, los cuerpos cohesionados de mayor tamaño del universo, que ensamblan miles de galaxias, sumergidas en una inmensa nube de gas caliente y ligadas por la gravedad.

Empieza a intuirse, sin embargo, que la energía oscura representa el nexo clave entre varios aspectos de la formación de las galaxias y de los cúmulos de galaxias que hasta hace poco parecían desvinculados. La formación y la evolución de estos sistemas se hallan parcialmente supeditadas a las interacciones y fusiones entre galaxias, que a su vez podrían haber estado bajo el control estricto de la energía oscura.

Para establecer la intervención de la energía oscura en la formación de galaxias, empecemos por abordar el estado actual de la cuestión sobre génesis galáctica. Las teorías en boga se basan en la existencia de dos formas básicas de materia: materia bariónica y materia oscura. La bariónica es la materia común, cuyas partículas interaccionan fácilmente unas con otras, y, si están cargadas eléctricamente, con la radiación electromagnética. Debe el apelativo de “bariónica” a su constituyente principal, los bariones (protón y neutrón).

La materia oscura, distinta de la energía oscura, representa hasta el 85 por ciento de toda materia. Su propiedad más destacable es que las partículas que la componen no interactúan con la radiación. Desde el punto de vista gravitatorio, la materia oscura se comporta igual que la materia común.

Resumen/*La energía oscura*

- Se conoce a la energía oscura por acelerar la expansión cósmica. Esta “sustancia” sin identificar ejerce una fuerza antigravitatoria sobre el universo considerado en su conjunto.
- Es menos sabido que ejerce efectos secundarios sobre la materia del universo. Intervino en la creación de la estructura filamentosa característica de la materia a gran escala. A menor escala, parece haber frenado el crecimiento de los cúmulos de galaxias, hace unos seis mil millones de años.
- A escalas aún menores, ha reducido el ritmo con el que las galaxias se aproximan entre sí, colisionan y se fusionan. Estas interacciones dan su forma a las galaxias. De haber sido más débil o más intensa, la Vía Láctea quizás habría experimentado un menor ritmo de formación estelar. Los elementos pesados de que está hecho nuestro planeta podrían no haberse sintetizado nunca.

De acuerdo con los modelos, la materia oscura empezó a agruparse inmediatamente después de la gran explosión. Se crearon así burbujas esféricas, o "halos". Los bariones, por el contrario, no se aglomeraron en un inicio; lo impedían sus interacciones con la radiación. Permanecieron en una fase caliente y gaseosa. A medida que el universo se expandía, el gas fue enfriándose. Los bariones pudieron agruparse. Las primeras estrellas y galaxias surgieron de ese gas enfriado unos cientos de millones de años tras la gran explosión. No se materializaron en cualquier lugar, sino en los centros de los halos de materia oscura que ya habían adquirido forma.

Desde los años ochenta del pasado siglo, un número de teóricos ha realizado simulaciones detalladas por ordenador de este proceso; entre ellos se cuentan los grupos dirigidos por Simon D. M. White, del Instituto Max Planck de Astrofísica en Garching, y por Carlos S. Frenk, de la Universidad de Durham. Según sus cálculos, la mayoría de las primeras estructuras fueron halos de materia oscura pequeños y con poca masa. Considerada la alta densidad del universo primitivo, los halos (y las galaxias que contenían) se fusionaron para crear sistemas de mayor masa. La construcción de una galaxia, pues, procedería de abajo arriba, como en las construcciones por piezas Lego. (En un proceso de arriba abajo se edificaría la casa y se la destruiría para hacer ladrillos.) Mis colegas y yo hemos contrastado estos resultados con nuestras observaciones de galaxias lejanas y de sus fusiones a lo largo del tiempo cósmico.

La formación de galaxias se debilita

De acuerdo con el desarrollo de la investigación astronómica, una galaxia pierde su forma cuando se fusiona con otra. Las galaxias más primitivas que alcanzamos a ver existían cuando el universo tenía unos mil millones de años. Muchas de ellas, sin duda, parecen estar en un proceso de fusión. Con el paso del tiempo, la fusión de galaxias de masa importante parece menos frecuente. Entre los dos mil y los seis mil millones de años después de la gran explosión —esto es, a lo largo de la primera mitad de la historia cósmica—, la fracción de galaxias grandes en proceso de fusión cayó desde la mitad a casi cero. Desde entonces, la distribución de las siluetas galácticas se ha congelado; choques y fusiones son poco frecuentes.

El 98 por ciento de las actuales galaxias dotadas de masa notable son elípticas o espirales, con estructuras que habrían desaparecido en una colisión. Estas galaxias, que presentan una alta estabilidad, se componen, sobre todo, de estrellas viejas, prueba de que se generaron muy pronto y han mantenido una morfología regular durante largo tiempo. En el presente, sólo unas pocas galaxias están en colisión, aunque de masa irrelevante.

El cese virtual de las fusiones galácticas no es la única manifestación del descenso de actividad del universo desde que tenía la mitad de la edad actual. Ha mermado la formación estelar. La mayoría de las estrellas que hoy vemos nacieron en la primera mitad de la historia cósmica, según demostraron varios equipos en los años noventa; entre ellos, los dirigidos por Simon J. Lilly, entonces en la Universidad de Toronto, Piero Madau, a la sazón en el Instituto de Ciencias del Telescopio Es-

NASA, ESA, EQUIPO DE PROYECTOS CLAVE DEL TELESCOPIO HUBBLE Y DE BUSQUEDAS DE SUPERNOVA DE ALTO Z


Supernova 1994D
en la galaxia NGC 4526

PRUEBAS DE LA EXISTENCIA DE LA ENERGIA OSCURA

EXPLOSIONES DE SUPERNOVA
En un universo en expansión, las galaxias se alejan unas de otras a una velocidad que depende de la distancia mutua. Las supernovas ofrecen otro parámetro para medir el mismo efecto: su corrimiento espectroscópico al rojo revela la velocidad de las galaxias a las que pertenecen; su brillo, la distancia. Resulta que las galaxias de hace miles de millones de años se movían más despacio de lo que predice una simple extrapolación lineal del ritmo actual de expansión. El ritmo de expansión ha tenido que aumentar desde entonces. Esa es la señal distintiva de la energía oscura.

RADIACION DEL FONDO COSMICO DE MICROONDAS
Las imágenes de la radiación de fondo presentan irregularidades cuyos tamaños reflejan la geometría global del espacio y, por tanto, la densidad del universo, que excede del monto de materia (tanto de la común como de la exótica): una componente desconocida —la energía oscura— debe poner la diferencia. Es más, la radiación de fondo ha sido modificada por los campos gravitatorios de las estructuras cósmicas. La magnitud de la modificación depende de cómo haya cambiado el ritmo de expansión con el tiempo. Concuerda con el efecto de la energía oscura.

CONFIGURACION GALACTICA
Las galaxias no se distribuyen aleatoriamente por los cielos. Se disponen según ciertos patrones, y uno de ellos se parece a las manchas del fondo de microondas. Sirve para medir la masa total del universo y confirma la necesidad de la energía oscura.

LENTES GRAVITATORIAS
Un objeto de mucha masa puede actuar como una lente porque su gravedad dobla la luz. La lente produce imágenes múltiples, como en una casa de espejos, si la fuente de luz se encuentra directamente detrás; un alineamiento tal es más probable cuanto mayor sea el universo, lo que a su vez depende de la cantidad de energía oscura. Una lente débil doblará la luz con un ángulo pequeño, que dependerá de la masa de la lente. El estudio de este proceso ha determinado la manera en que las aglomeraciones de materia han crecido con el tiempo. En el resultado se percibe la huella de la energía oscura.

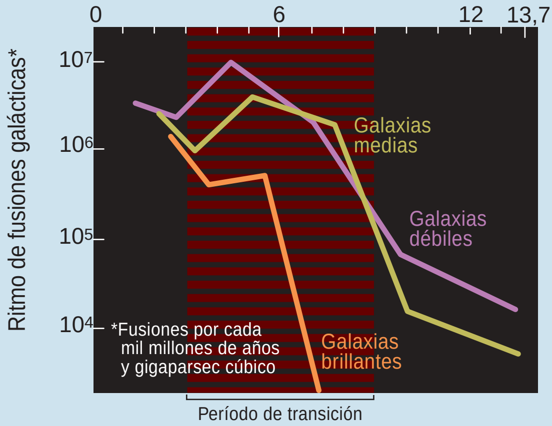
CUMULOS DE GALAXIAS
Las observaciones en rayos X trazan la evolución de la masa de los cúmulos galácticos. Se necesita a la energía oscura para explicar cuándo y cómo se formaron.

La energía oscura toma las riendas

A pesar de su rápido comienzo tras la gran explosión, la construcción del universo se frenó pronto. Al principio, las galaxias se fusionaban unas con otras, cambiaban de forma y creaban estrellas a un ritmo vivaz, pero esta actividad ha declinado desde que la fuerza de la energía oscura vino a ser equiparable a la fuerza de la materia (*área marrón en las gráficas*). ¿Coincidencia?

LAS GALAXIAS DEJARON DE FUSIONARSE

Las galaxias más brillantes dejaron de colisionar y fusionarse a la edad cósmica de seis mil millones de años. Las galaxias menos luminosas pueden todavía converger, pero ahora es mucho menos probable que lo hagan.

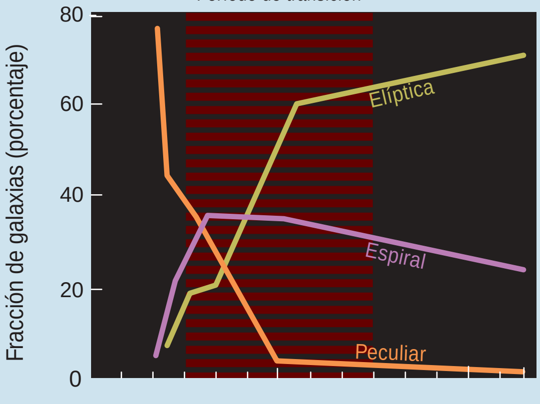




Galaxias NGC 4676, que se están fusionando

LAS GALAXIAS ADOPTARON FORMAS REGULARES

En un principio, la mayoría de las galaxias tenían conformaciones peculiares, signo de que estaban colisionando entre ellas. Cuando las fusiones se hicieron menos frecuentes, pasaron a prevalecer las configuraciones espirales y elípticas.

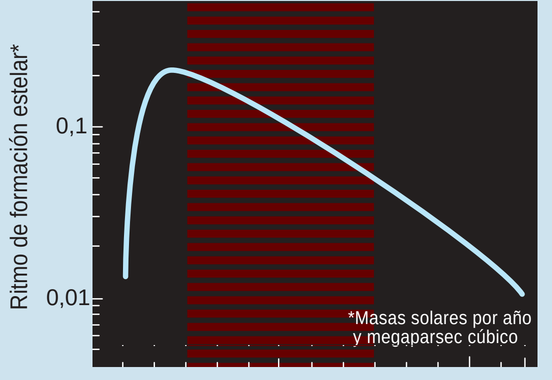




Grupo compacto de galaxias Hickson 87

DISMINUYO LA FORMACION ESTELAR

El universo primitivo era una caldera de formación de estrellas, pero el ritmo de formación estelar tuvo su máximo muy pronto y comenzó a decaer. Nunca ha sido menor que hoy.

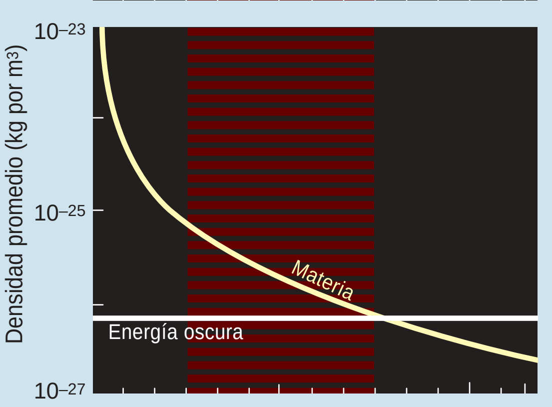


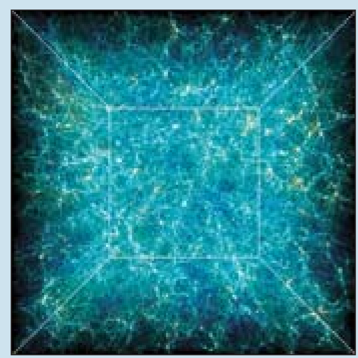


Nuevas estrellas en el cúmulo del Trapecio

LA ENERGIA OSCURA ADQUIRIO PREEMINENCIA

Todas estas tendencias observadas pueden guardar relación con un mismo hecho: la expansión del universo enrarece la materia; a medida que su densidad se aproxima a la de la energía oscura (que se presupone constante en los modelos más sencillos), el ritmo de expansión pasa de decelerado a acelerado. Las galaxias se separaron desde entonces cada vez más deprisa, por lo que es menos probable que choquen unas con otras o barran gas con el que puedan iniciar la formación estelar.





Simulación de la distribución de materia

LUCY READING-IKKANDA (*gráficas*); ANDREW HOPKINS *Universidad de Sydney* (*fuente de la gráfica de formación estelar*); EQUIPO DE INGENIERIA Y CIENCIA DE NASA/ACS (*fusión de galaxias*); NASA/ESA/STScI/PATRIMONIO DEL HUBBLE *Photo Researchers, Inc.* (*grupo de Hickson*); NASA/K.L. LUHMAN *Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard* Y G. SCHNEIDER, E. YOUNG, G. RIEKE, A. COTERA, H. CHEN, M. RIEKE Y R. THOMPSON *Observatorio Steward, Universidad de Arizona* (*cúmulo del Trapecio*); GENERACION DE IMAGENES POR EL INSTITUTO DE VISUALIZACION DE LA UNIVERSIDAD DE STUTTGART, DATOS PROCEDENTES DEL CONSORCIO DE SUPERCOMPUTACION VIRGO DE LA SOCIEDAD MAX PLANCK EN GARCHING Y EL INSTITUTO PARA LA COSMOLOGIA COMPUTACIONAL (*simulación de la distribución de materia*)

pacial, y Charles C. Steidel, del Instituto Tecnológico de California.

En fecha más reciente se ha dado con la razón de dicha tendencia. La formación de estrellas acabó muy pronto en las galaxias grandes. Desde que el universo tenía la mitad de la edad actual, sólo los sistemas ligeros han continuado creando estrellas a un ritmo apreciable. A semejante desplazamiento en la localización de la producción de estrellas se le denomina "reducción galáctica" [*véase* "El universo maduro", por Amy J. Barger; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2005]. Con ella nos enfrentamos a una paradoja. La teoría de la formación de galaxias predice que las más pequeñas se conforman antes y que, a medida que se fusionan, surgen las galaxias grandes. La historia de la formación estelar muestra lo contrario: en un comienzo, los principales viveros de estrellas son las galaxias mayores; las pequeñas toman más tarde el relevo.

Llama asimismo la atención que el crecimiento de los agujeros negros supermasivos, situados en los centros de las galaxias, se haya frenado de manera notable. Estos agujeros abastecen a los cuásares y demás tipos de galaxias activas, bastante raras en el universo moderno; los agujeros negros de nuestra galaxia y de otras galaxias se hallan quiescentes. ¿Guardan relación entre sí estas tendencias de la evolución galáctica? ¿No será la energía oscura la razón de fondo de ambas?

El constante influjo de la energía oscura

Algunos astrónomos han propuesto que los procesos internos de las galaxias, como la liberación de energía por los agujeros negros y las supernovas, acabaron con la actividad galáctica y la formación estelar. Pero ahora parece que la energía oscura podría ser una causa más profunda, la que lo ligaría todo. La prueba principal estriba en la coincidencia aproximada en el tiempo entre el final de la formación de galaxias y cúmulos de galaxias y el principio del domino de la energía oscura. Final y comienzo que ocurrieron cuando el universo apenas contaba con la mitad más o menos de su edad presente.

Hasta ese momento de la historia cósmica, la densidad de materia era tan alta, que las fuerzas gravitatorias entre las galaxias se imponían a los efectos de la energía oscura. Las galaxias se rozaban, interaccionaban unas con otras y, a menudo, se fusionaban. Las colisiones de nubes de gas galácticas que así se producían engendraban estrellas y los agujeros negros crecían a medida que se conducía gas hacia el centro de los sistemas.

Con el transcurso del tiempo y la expansión del espacio, la materia se enrareció, lo que debilitó su gravedad; en cambio, la fuerza de la energía oscura permaneció constante (o casi constante). El consiguiente desplazamiento del punto de equilibrio entre esas dos fuerzas provocó que el ritmo de la expansión pasara de una deceleración a una aceleración. Las galaxias se separaron; disminuyó el ritmo de las fusiones galácticas. Desprovistos de combustible, los agujeros negros se tornaron quiescentes.

Esta secuencia explicaría también la "reducción galáctica". Las agrupaciones más intensas corresponden a los halos de materia oscura de masa mayor y a las galaxias que contienen. Halos que residen en estrecha vecindad de otros halos masivos. Los primeros tropezarán, pues, con los vecinos antes que con sistemas de menor masa. Cuando sufren una de esas colisiones, experimentan un brote de formación estelar. Las estrellas recién formadas brillan intensamente y estallan; calientan entonces el gas e impiden su colapso gravitatorio, que engendraría nuevas estrellas. De esta manera, la formación estelar se ahoga a sí misma: cuando las estrellas calientan el gas del que emergen evitan el nacimiento de más estrellas.

El agujero negro del centro de tal galaxia actúa como otro inhibidor de la formación estelar. Una fusión de galaxias proporciona gas al agujero negro, que expulsa entonces unos chorros que calientan el gas del sistema y no dejan que se enfríe para constituir nuevas estrellas.

A tenor de los indicios, una vez que la formación estelar ha cesado no vuelve a comenzar; es probable que el gas de estos sistemas se haya agotado o que se haya calentado demasiado y no pueda enfriarse rápidamente. Aun así, estas galaxias grandes retienen la capacidad de fusionarse con otras, pero surgirán pocas estrellas nuevas, un proceso que necesita gas frío. Mientras las galaxias masivas se estancan, las pequeñas siguen interactuando y creando estrellas. El resultado final es que las galaxias mayores adoptan su conformación antes que las galaxias menores, tal y como se observa. Entra dentro de lo verosímil que la energía oscura modulara el proceso al determinar el grado de reagrupamiento galáctico y la cadencia de las fusiones galácticas.

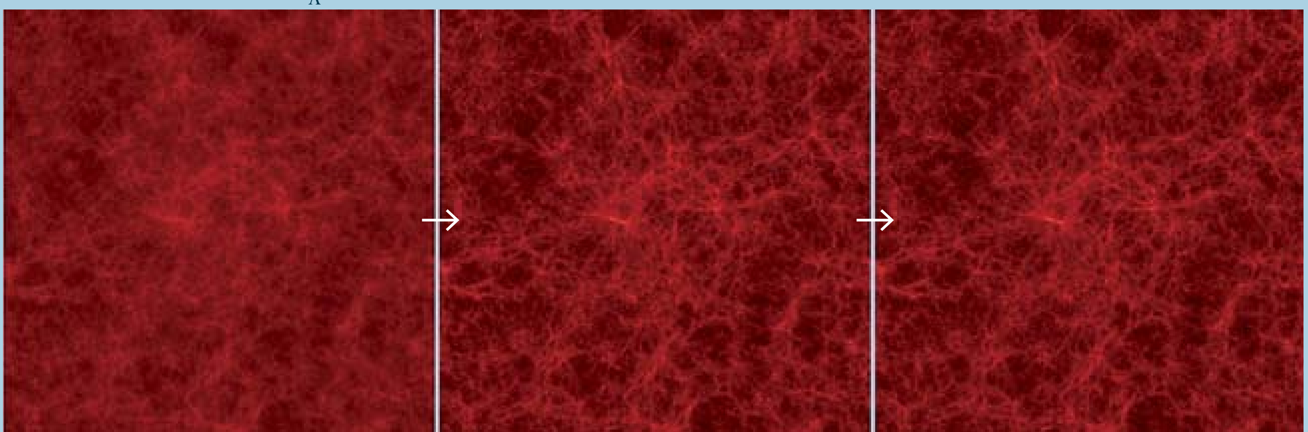
La energía oscura podría explicar la evolución de los cúmulos de galaxias. Los cúmulos antiguos, establecidos cuando el universo tenía menos de la mitad de su edad actual, comprendían tanta masa como los actuales. Es decir, los cúmulos de galaxias apenas han crecido durante los últimos seis mil u ocho mil millones de años. Estancamiento en su tamaño que refleja que la entrada de galaxias en los cúmulos se redujo desde que el universo alcanzó la mitad de su edad presente, prueba directa de que la energía oscura afecta a la interacción de las galaxias a grandes escalas. Desde mediados de los años noventa se sabía que los cúmulos de galaxias apenas habían aumentado durante los últimos ocho mil millones de años. Se atribuyó a densidades de materia mucho menores de lo que predicen los argumentos teóricos. El descubrimiento de la energía oscura pone fin a esta tensión entre las observaciones y la teoría.

Una muestra de que la energía oscura cambia la historia de los cúmulos galácticos la encontramos en el destino del Grupo Local, las galaxias de nuestro entorno más inmediato. Hasta hace unos pocos años, se admitía que la Vía Láctea y Andrómeda, su vecina más próxima, así como sus séquitos de galaxias satélites, caerían en

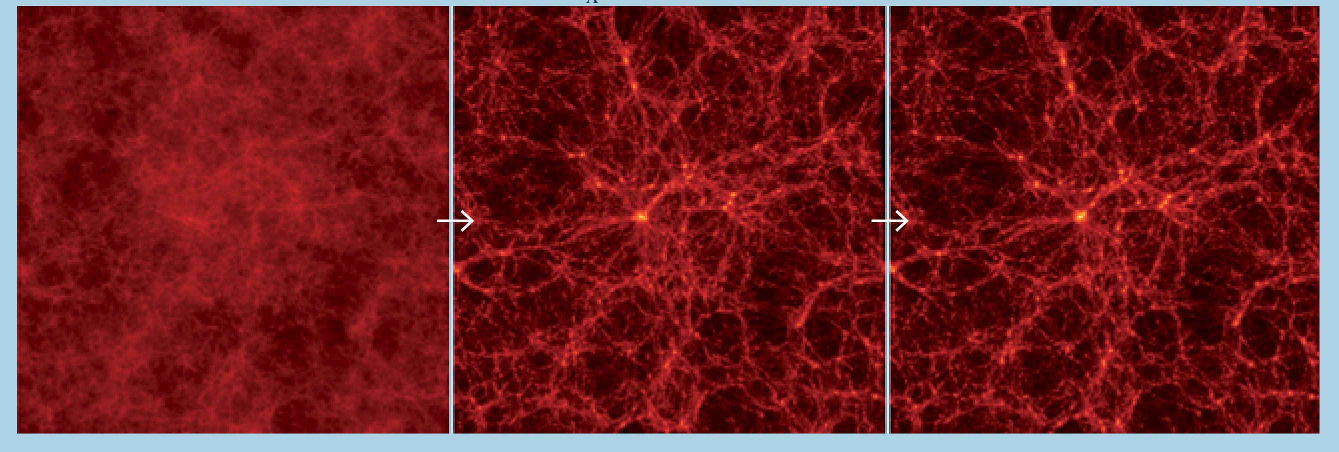
Situaciones hipotéticas

Si el universo dispusiera de más energía oscura ofrecería otro aspecto radicalmente diferente. La aceleración cósmica habría empezado antes, habría separado la materia más deprisa y habría abortado la generación de macroestructuras. Ocurriría justo lo contrario si el universo tuviera menos energía oscura. Cada recuadro inferior muestra una región con un diámetro actual de mil millones de años-luz y 27 millones de partículas, cada una de ellas correspondiente a una galaxia. Estas simulaciones presuponen que la densidad de energía oscura es constante en el espacio y en el tiempo. La cantidad Ω_Λ es el parámetro cosmológico dominante; representa la densidad de energía oscura hoy día.

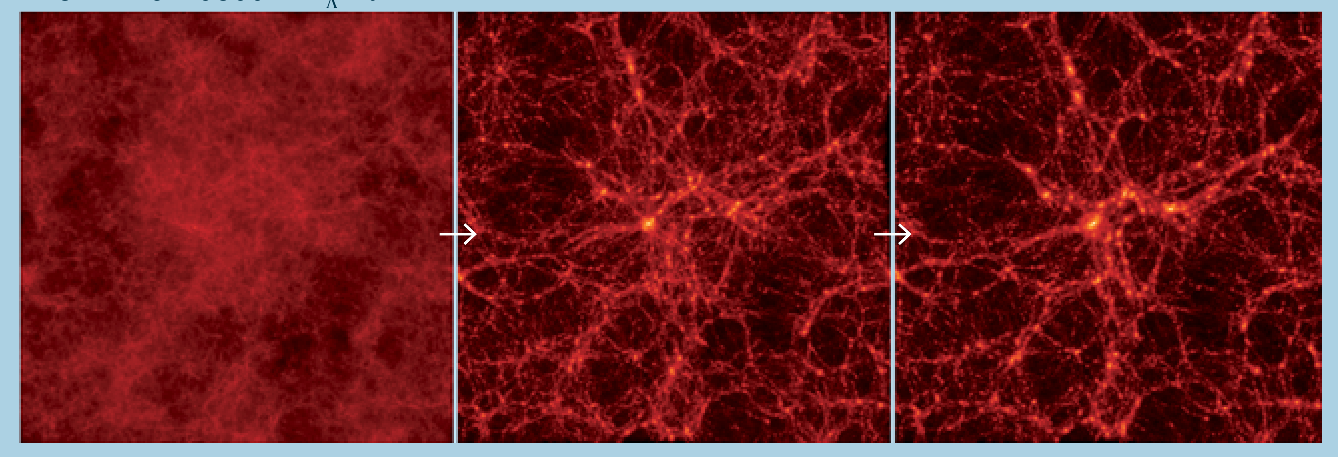
MAS ENERGIA OSCURA $\Omega_\Lambda = 0{,}99$



CANTIDAD OBSERVADA DE ENERGIA OSCURA $\Omega_\Lambda = 0{,}75$



MAS ENERGIA OSCURA $\Omega_\Lambda = 0$

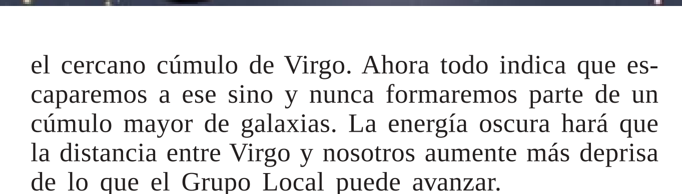


EL UNIVERSO PRIMITIVO: Cuando el tamaño del universo era un sexto del actual, la materia se distribuía por igual en las tres hipótesis. La energía oscura no había ejercido aún su influencia.

PERIODO DE TRANSICION: cuando el universo alcanzó el 75 por ciento de su tamaño actual, los efectos de la energía oscura eran ya patentes. En la hipótesis de una de mayor cantidad de energía oscura (*arriba*), el universo se presenta amorfo. En las otras dos, la formación de estructuras continúa y genera una telaraña cósmica.

HOY: en un universo con la densidad observada de energía oscura (*centro*), la formación de estructuras de gran escala ha terminado; la telaraña se ha congelado. Sin energía oscura (*abajo*), la telaraña sigue evolucionando.

LIANG GAO, CARLOS FRENK Y ADRIAN JENKINS *Instituto de Cosmología Computacional, Universidad de Durham*



el cercano cúmulo de Virgo. Ahora todo indica que escaparemos a ese sino y nunca formaremos parte de un cúmulo mayor de galaxias. La energía oscura hará que la distancia entre Virgo y nosotros aumente más deprisa de lo que el Grupo Local puede avanzar.

Al controlar el desarrollo de los cúmulos, la energía oscura regula la construcción de galaxias de su interior. El entorno del cúmulo facilita la formación de una amplia diversidad de galaxias: lenticulares, gigantes elípticas, enanas elípticas. Puesto que la energía oscura regula la incorporación de galaxias a los cúmulos, dicta de paso la abundancia relativa de esos tipos galácticos.

Parece verosímil, pero ¿es cierto? La fusión de galaxias, la actividad de los agujeros negros y la formación estelar han decaído con el tiempo; es muy probable que los tres hechos guarden relación. No se conoce todavía la secuencia correcta de los acontecimientos. Gracias a los rastreos en marcha del Telescopio Espacial Hubble y del Observatorio Chandra de rayos X, y los efectuados con técnicas de imagen y espectroscopía terrestres muy sensibles, se profundizará en la posible conexión durante los próximos años. Una manera de realizar este estudio consiste en obtener un buen censo de galaxias activas lejanas y determinar el momento en que experimentaron la última fusión. Para el análisis habrá que desarrollar herramientas teóricas novedosas en los próximos años.

Un nuevo equilibrio

Un universo en aceleración dominado por la energía oscura explica de un modo coherente los cambios observados en la población de galaxias; es decir, el cese de las fusiones y sus muchos corolarios, como la pérdida de una formación estelar vigorosa y el final de las metamorfosis galácticas. Si la energía oscura no hubiera existido, las colisiones de galaxias habrían continuado durante más tiempo y el universo contendría hoy día muchas más galaxias de gran masa con poblaciones estelares viejas. Contendría, por ello mismo, menos sistemas de masa irrelevante; las galaxias espirales como la Vía Láctea serían escasas (ya que las espirales no pueden sobrevivir a las fusiones). Las macroestructuras galácticas mantendrían una cohesión más firme. Cabría, pues, esperar un número mayor de fusiones y crecimiento de estructuras.

Por el contrario, si la energía oscura hubiera sido más intensa de lo que es, el universo habría experimentado menos fusiones; habría menos galaxias grandes y cúmulos galácticos. Las galaxias espirales y las enanas de masa escasa menudearían, porque no habría habido en el tiempo tantas colisiones entre galaxias, al encerrar los cúmulos galácticos mucha menos masa. Hasta podría no haber cúmulos. También habría sido posible que se formaran menos estrellas y que una fracción mayor de la materia bariónica del universo permaneciera en estado gaseoso.

Aunque dé la impresión de que estos procesos nos caen muy lejos, la manera en que se forman las galaxias influye en nuestra existencia. Se necesitan estrellas donde se generen elementos más pesados que el litio, de los que están hechos los planetas terrestres y la vida. Con ritmos de formación estelar menores, el universo contendría menos planetas; la vida quizá no hubiese aparecido nunca. La energía oscura pudo haber ejercido un efecto determinante en numerosos aspectos del universo, en la epidermis sin relación entre sí; pudo incluso haber dejado su sello en la historia de nuestro planeta.

La energía oscura no ha concluido su trabajo. Quizá beneficie a la vida: la aceleración impide el colapso tan temido hasta ayer por los astrónomos. Pero la energía oscura comporta otros riesgos. Hace que las galaxias más distantes retrocedan tan deprisa, que las perdemos de vista para siempre. El espacio se está vaciando. Nuestra galaxia y sus vecinas más cercanas serán una isla cada vez más solitaria. Los cúmulos galácticos, las galaxias e incluso las estrellas que vagan por el espacio intergaláctico contarán con esferas de influencia gravitatoria no mucho mayores que sus propios tamaños.

Aún peor, la energía oscura podría estar evolucionando. Algunos modelos predicen que, si la energía oscura se vuelve predominante con el tiempo, romperá los objetos ligados por gravedad. Disgregará cúmulos galácticos y galaxias. Más tarde, la Tierra será arrancada del Sol y se disgregará también, al igual que los demás planetas. Incluso los átomos serán destruidos. La energía oscura, una vez ensombrecida por la materia, tendrá su venganza final.

El autor

Christopher J. Conselice enseña en la Universidad de Nottingham, adonde se ha trasladado recientemente desde el Instituto de Tecnología de California. Se ha especializado en la formación de galaxias y dirige varios programas de observación en luz infrarroja y visible con telescopios tanto de superficie como espaciales.

Bibliografía complementaria

A DIRECT MEASUREMENT OF MAJOR GALAXY MERGERS AT $z \lesssim 3$. Christopher J. Conselice, Matthew A. Bershady, Mark Dickinson y Casey Papovich en *Astronomical Journal*, vol. 126, n.º 3, págs. 1183-1207; septiembre 2003.

DARK ENERGY. Robert R. Caldwell en *Physics World*, vol. 17, n.º 5, págs. 37-42; mayo 2004.

THE EXTRAVAGANT UNIVERSE: EXPLODING STARS, DARK ENERGY, AND THE ACCELERATING COSMOS. Robert P. Kirshner. Princeton University Press, 2004.

THE INFINITE COSMOS: QUESTIONS FROM THE FRONTIERS OF COSMOLOGY. Joseph Silk. Oxford University Press, 2006.

YACIMIENTOS FOSILIF



Los huesos de numerosos animales muertos hace 70 millones de años se acumulan en yacimientos de Madagascar. Se ha determinado qué causó esa mortandad

Raymond R. Rogers
y David W. Krause

1. RESTOS FOSILES DE UN PODEROSO DINOSAURIO CARNIVORO, *Majungatholus atopus* (*foto superior*). Murió hace 70 millones de años en un lugar hoy en día en el noroeste de Madagascar (*página siguiente, foto superior*). Al desenterrar los restos, se recuperó la mandíbula con dientes en sierra, apta para despedazar la carne (*foto a la derecha*). Los paleontólogos empaquetaron con escayola las piezas fósiles para transportarlas a Estados Unidos (*página siguiente, foto inferior*), para averiguar las causas posibles de su muerte.

RAYMOND R. ROGERS

EROS DE MADAGASCAR





El cuerpo se apoya sobre el costado izquierdo, la cabeza y el cuello están doblados hacia atrás, hacia la pelvis: postura típica de la muerte. Los brazos y las piernas todavía se encuentran en correcta posición anatómica y persisten la mayoría de los huesos, aunque un examen más detallado muestra que los de las manos y de los pies se han dislocado. También el cráneo está algo desarticulado, pero todos sus huesos se encuentran próximos entre sí. Curiosamente, falta el extremo de la cola. Cerca aparecen los restos de más esqueletos, en diverso estado de conservación y de dispersión. Unos, completos; de otros, sólo queda un cráneo, una escápula o un hueso de las extremidades. ¿Dónde murieron estos animales? ¿Allí donde los desenterramos o se agruparon sus restos después? ¿Murieron a la vez o fueron acumulándose a lo largo de mucho tiempo? ¿Cuál fue la causa de su muerte?

Estas preguntas se suscitaron en cuanto descubrimos la fosa común en el verano de 2005. Nuestro equipo, compuesto de paleontólogos y geólogos estadounidenses y malgaches, trabaja en estos sedimentos del noroeste de la isla, que recibe el apodo de "Gran Isla Roja" por el intenso color rojo veneciano de sus tierras. A medida que buscábamos respuestas, íbamos recopilando información. Con todo, la forma en que acometimos la investigación quizá resulte tan interesante como el fruto de la misma.

Empezamos por bautizar al yacimiento: MAD05-42, que cifra el año de su descubrimiento y el número correlativo de campo fosilífero hallado en esa área. El segundo paso consistió en identificar los

CASO PENDIENTE

esqueletos fósiles. Gracias a otros descubrimientos de la misma región, determinamos pronto que la mayoría de los restos pertenecían a diferentes especies de dinosaurios.

No se trata del único cementerio de dinosaurios del noroeste de Madagascar. Concuerda con un patrón que hemos observado repetidamente a lo largo de un decenio de investigaciones geológicas en los terrenos semiáridos cercanos al pueblo de Berivotra. Hemos descubierto allí niveles sobre niveles de muerte masiva, de esqueletos de animales grandes y pequeños, jóvenes y viejos, enterrados juntos, formando espectaculares lechos repletos de huesos. Así, mientras trabajábamos para descubrir la causa de la muerte de los animales del yacimiento MAD05-42 no podíamos sino preguntarnos también la razón de que hubiera tanta acumulación de huesos en perfecto estado de conservación.

Reapertura de un caso cerrado hace mucho

Han transcurrido demasiados millones de años para que podamos aplicar el armamentario forense actual. Para extraer pistas de los huesos y del sedimento debemos recurrir a técnicas geológicas de datación y emplear los métodos de la tafonomía, disciplina que estudia los procesos que experimentan los restos de un organismo desde su muerte hasta que quedan enterrados.

Comenzamos a extraer los huesos de la matriz rocosa. Al principio, empleamos palas y martillos de geólogo, que retiran el sedimento que los cubre, pero después los huesos se exponen con instrumentos de dentista y finos pinceles. Hubimos de tener mucho cuidado en no dañar la frágil superficie de los huesos. Una vez que quedaron expuestos, se cartografiaban y fotografiaban con sumo detalle. Quedaba registrado dónde aparecían y se anotaban las posibles relaciones espaciales entre restos.

Luego, impregnamos los huesos con colas consolidantes y los protegimos con un envoltorio de escayola y arpillera. Cada hueso así tratado se inventarió y empaquetó para su transporte hasta nuestros laboratorios en Estados Unidos. Allí retiramos el sedimento residual y estudiamos los huesos a fondo, prestando particular atención a cualquier marca superficial que pudiera indicarnos la causa de la muerte.

Se pudo determinar *in situ* que los esqueletos procedían de rocas sedimentarias de la Formación Maevarano, unas decenas de metros por debajo de las rocas que corresponden al límite entre el Cretácico y el Terciario. Este límite tiene 65 millones de años de antigüedad; señala el momento en que todos los dinosaurios (excepto las aves) y muchos otros grupos de especies sufrieron una extinción en masa por todo el planeta [*véase* “Impactos repetidos”, por Lunnan Becker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2002; y “El episodio de impacto de Chicxulub”, por David A. Kring y Daniel Durda; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2004].

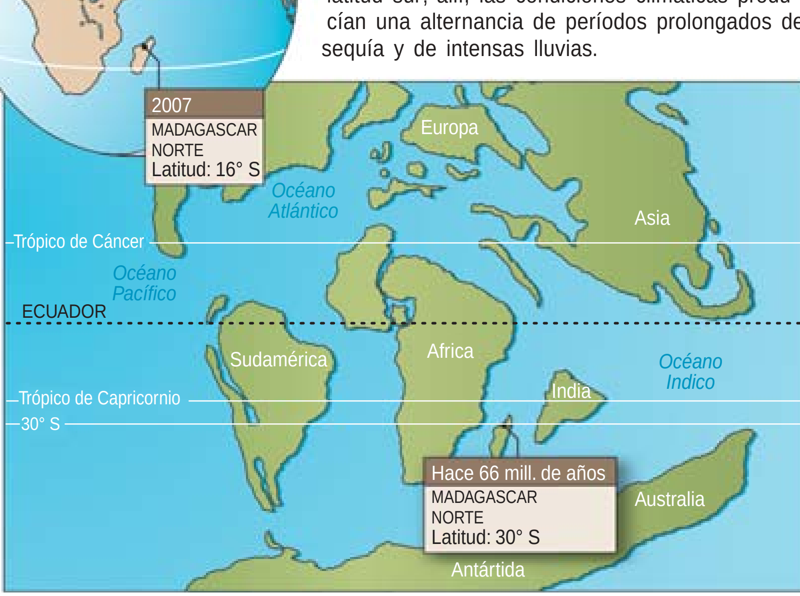
Nuestro lecho de huesos se encuentra 44,5 metros por debajo de este horizonte de extinción en masa y 14,5 metros por debajo del límite superior de la Formación Maevarano. Medimos el grado de desintegración radiactiva de algunos minerales de rocas de origen volcánico de los niveles por debajo de la formación y obtuvimos así una datación de 88 millones de años de antigüedad. Por encima de la formación y entreverados con ella, había sedimentos de origen marino que el flujo y reflujo de las mareas depositó en la orilla de la isla. Estos sedimentos contienen conchas y pequeños esqueletos de microorganismos unicelulares, datados en otros yacimientos cerca del final del período Cretácico, aunque sin llegar al final propiamente dicho de ese intervalo.

Tomados en su conjunto, los registros cronológicos mostraban que las muertes se produjeron hace unos 70 millones de años. Es decir, la causa de muerte de los dinosaurios hallados en MAD05-42 no guardaba relación con la extinción general que se produjo varios millones de años más tarde.

La tafonomía aceleró el progreso de nuestra investigación. Los estudios

REGISTRO GEOLOGICO

LA HISTORIA DE LOS SUELOS de la isla de Madagascar proporciona algunas pistas sobre la causa de la muerte de tantos animales hace 70 millones de años. Al inicio de la era Mesozoica (hace 250 millones de años), Madagascar formaba parte de Gondwana. La actividad tectónica modificó la posición de las placas terrestres. Al inicio del período Cretácico (hace 130 millones de años), Madagascar se encontraba a unos 400 kilómetros del continente africano. Luego se unió a la placa continental africana y se desplazó hacia el norte. Cuando la mortandad que estamos investigando (*mapa inferior*), el norte de Madagascar se encontraba cerca de los 30 grados de latitud sur; allí, las condiciones climáticas producían una alternancia de períodos prolongados de sequía y de intensas lluvias.



LUCY READING-IKKANDA

Muertes en masa

Uno de los primeros yacimientos descubiertos, MAD93-18, revela con nitidez inigualable la naturaleza recurrente de la mortalidad en masa en el antiguo Madagascar. El yacimiento MAD93-18 presenta tres horizontes de fósiles consecutivos, uno sobre otro. Las excavaciones proporcionaron el esqueleto entero del *Rapetosaurus* (*fotografía inferior derecha e inferior izquierda*), un saurópodo enorme. Aportó también restos óseos de numerosas especies, muchas de ellas nuevas para la ciencia, como los huesos pequeños y delicados de un ave primitiva, *Rahonavis ostromi* (*derecha*).







CATHERINE FORSTER *Universidad de Stony Brook (arriba)*; DESIRE RANDRIANARISTA CENTRO *ValBio (Centro Internacional de Educación para el Estudio de la Biodiversidad) (abajo a la izquierda)*; RAYMOND R. ROGERS *(abajo a la derecha)*

tafonómicos analizan las modificaciones que sufren los huesos (si están quemados, rotos o mordidos), las alteraciones de los esqueletos (cuál es su estado de desarticulación o si algún depredador o carroñero se ha llevado alguna parte) y la historia de su enterramiento (cómo quedaron sepultados los fósiles y qué les sucedió después). Por último, la tafonomía aborda los procesos de fosilización; es decir, el mecanismo de mineralización del hueso.

Tras analizar el yacimiento MAD05-42 desde una perspectiva tafonómica, podemos afirmar que las muertes se produjeron en el transcurso de un período prolongado de tiempo, quizá semanas o meses, porque los esqueletos nos hablan de historias postmórtem dispares. Mientras unos cuerpos se encuentran enteros, otros están desarticulados y sus huesos muy dispersos; la muerte no pudo sorprender a la vez a ambos. Unos huesos tienen una conservación perfecta, en tanto que otros muestran indicios de meteorización avanzada y de degradación de la superficie. Cuando los animales hallados en un mismo osario tienen diferentes momentos de muerte, decimos que el yacimiento está “promediado en el tiempo”.

A partir de los datos tafonómicos podemos estimar cuánto tiempo pasó desde la primera muerte hasta la última. Aunque no resulta posible determinar con exactitud el tiempo de formación de este yacimiento, sí podemos sostener que los animales no murieron simultáneamente.

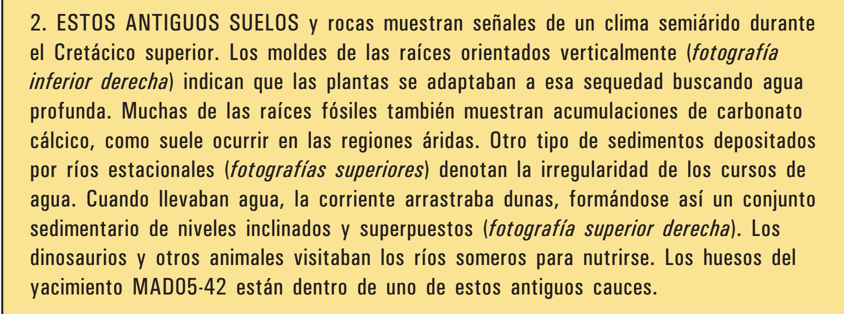
La escena del crimen

La historia geológica de Madagascar proporciona otras pistas importantes sobre la causa de la muerte de estos dinosaurios. Al principio de la era Mesozoica (hace 250 millones de años), Madagascar estaba unida a Gondwana (la mitad meridional del supercontinente Pangea), a caballo entre Africa y la India, y con la Antártida sita cerca de su punta meridional. La actividad tectónica reconfiguró las placas terrestres a gran escala. En el Jurásico superior (hace 160 millones de años), Madagascar se había desprendido de Africa y movido hacia al sur, con la India de









2. ESTOS ANTIGUOS SUELOS y rocas muestran señales de un clima semiárido durante el Cretácico superior. Los moldes de las raíces orientados verticalmente (*fotografía inferior derecha*) indican que las plantas se adaptaban a esa sequedad buscando agua profunda. Muchas de las raíces fósiles también muestran acumulaciones de carbonato cálcico, como suele ocurrir en las regiones áridas. Otro tipo de sedimentos depositados por ríos estacionales (*fotografías superiores*) denotan la irregularidad de los cursos de agua. Cuando llevaban agua, la corriente arrastraba dunas, formándose así un conjunto sedimentario de niveles inclinados y superpuestos (*fotografía superior derecha*). Los dinosaurios y otros animales visitaban los ríos someros para nutrirse. Los huesos del yacimiento MAD05-42 están dentro de uno de estos antiguos cauces.



remolque. En el Cretácico superior (hace 88 millones de años), Madagascar volvió a unirse a la placa africana, pero quedó separada del continente por 400 kilómetros de mar. Mientras, el subcontinente indio y la Antártida se alejaron, dejando a la cuarta isla mayor del mundo sola en medio del océano Indico.

Tras su unión a la placa africana, Madagascar se desplazó hacia el norte hasta alcanzar su ubicación actual, en los trópicos australes. Pero cuando se produjo la acumulación de cuerpos que investigamos, hace 70 millones de años, el norte de Madagascar se encontraba cerca de los 30 grados de latitud sur. Es decir, aún lejos del trópico de Capricornio (que hoy atraviesa el sur de Madagascar) y seguramente sometida a las pautas del clima subtropical.

En la actualidad, los mayores desiertos y territorios semidesérticos se encuentran en las franjas comprendidas entre los 15 y 35 grados de latitud al norte y sur del ecuador. Estos cinturones de clima árido responden a patrones de la circulación atmosférica a gran escala (las células de Hadley), que dirigen hacia estas áreas grandes masas de aire cálido y seco que han cedido su humedad cerca del ecuador. Las zonas de altas presiones resultantes del descenso de tales masas de aire impiden la llegada de precipitaciones durante gran parte del año, pero cuando llegan pueden ser intensas.

Las rocas de la Formación Maevarano presentan indicios convincentes de un tipo de clima semiárido y estacional durante el Cretácico superior. Los mejores los aportan los paleosuelos rojos, oxidados, donde se preservan muy bien moldes de raíces de plantas con orientación vertical. En la actualidad, la orientación vertical de las raíces es frecuente en las plantas adaptadas a condiciones de aridez; así buscan nutrientes y humedad en suelos profundos. Además, muchas de las raíces fósiles de la Formación Maevarano están cubiertas por carbonato cálcico, o exhiben nódulos de carbonato, concentraciones irregulares de ese mineral. Hoy en día, los suelos oxidados ricos en carbonato cálcico se generan en regiones áridas o semiáridas donde la evaporación y la transpiración limitan los efectos de las precipitaciones.

Otros sedimentos de ese terreno antiguo se depositaron en ríos arenosos, poco profundos. Es una señal poderosa de clima subtropical, con cursos de agua irregulares que fluctuaban mucho y estacionales, a buen seguro. Cuando los ríos de este tipo llevaban agua, la corriente iba dibujando ondas y arrastrando dunas, con lo que se creaban capas inclinadas que los geólogos denominan "de estratificación cruzada".

Sin ninguna duda, los dinosaurios y muchos otros animales frecuentaban estos ríos en busca de agua, alimento o refugio. Los huesos del yacimiento MAD05-42 se hallan dentro de un antiguo curso fluvial. Parte del año, el río estaba seco; en otros momentos, llevaba un fluido espeso, cargado de lodos y arenas. Más adelante volveremos a hablar de estas aguas cenagosas, porque son una de las claves de nuestra historia.

Identificación del asesino

Un animal puede encontrar la muerte de muchas formas, demasiadas quizá para determinar a partir del registro fósil la que le tocó en suerte. Pero las opciones disminuyen cuando se

Carroñeros

Los episodios de mortalidad general que se sucedieron en Madagascar durante el Cretácico superior proporcionaban un auténtico festín para los necrófagos. El nivel trófico ocupado por la carroña no puede quedar abandonado si se quiere que el ciclo biológico curse sin problemas. En la actualidad hay animales muy diversos que cumplen este papel, desde las bacterias hasta grandes vertebrados. Junto con nuestro colega Eric M. Roberts, hallamos señales de la actividad de insectos necrófagos en la superficie de los huesos de dinosaurio de Madagascar: perforaciones ovaladas de un centímetro de largo en el tejido esponjoso de los huesos. Estas depresiones nos dicen que los escarabajos adultos se alimentaron de la carroña y depositaron sus huevos cerca. Tras la eclosión, las larvas se nutrieron también y con sus potentes mandíbulas perforaron el hueso para construir las cámaras de pupación.

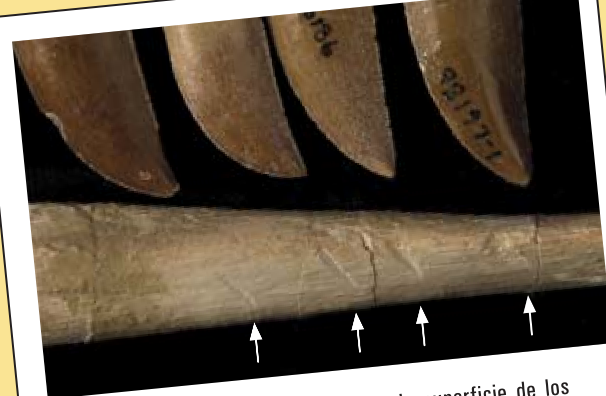
Los insectos no eran los únicos organismos que se alimentaban de los muertos. Algunas mordeduras aportan pruebas irrefutables de que lo hacían dinosaurios. En colaboración con Kristina Curry Rogers, del Museo de Ciencia de Minnesota, hemos documentado marcas de dientes en al menos tres osarios. Corresponden a un gran dinosaurio carnívoro de siete metros de largo, el terópodo *Majungatholus atopus*. Para descartar otras especies que pudiesen haber dejado esas marcas, comparamos el tamaño y la forma de las mordeduras con las mandíbulas y los dientes de diversos carnívoros.

Algunos de los huesos mordidos pertenecen a la especie *Rapetosaurus*, un dinosaurio saurópodo de cuello largo, desconocido hasta entonces y descrito por Curry Rogers en su tesis doctoral. Pero la gran mayoría de los huesos con mordeduras, principalmente vértebras, pertenecen al propio *Majungatholus*. El canibalismo es una estrategia ecológica que se ha observado a menudo en las especies actuales. No debió de ser un comportamiento extraño entre los dinosaurios. Sin embargo, resulta muy difícil demostrar este tipo de práctica. Las huellas que hemos encontrado en Madagascar constituyen los únicos casos bien documentados de canibalismo entre dinosaurios. Desafortunadamente, las mordeduras no permiten saber si *Majungatholus* mató a aquellos individuos —y por lo tanto cazó a miembros de su propia especie— o simplemente carroñeó sus restos.





1. ESTAS PERFORACIONES ovales en los huesos de dinosaurios (*fotografía superior*) indican que los escarabajos carroñeros infestaron los cadáveres, se alimentaron de su carne y dejaron sus huevos (*ilustración inferior*).



2. ESTAS MARCAS características en la superficie de los huesos y las pequeñas estrías dentro de ellas (*flechas*) concuerdan exactamente con el tamaño, la distancia entre los dientes y los carniceros bordes aserrados de la dentición de *Majungatholus*.

RAYMOND R. ROGERS (*arriba*); RAUL MARTIN (*centro*); MARYLOU STEWART *Universidad de Stony Brook* (*abajo*)

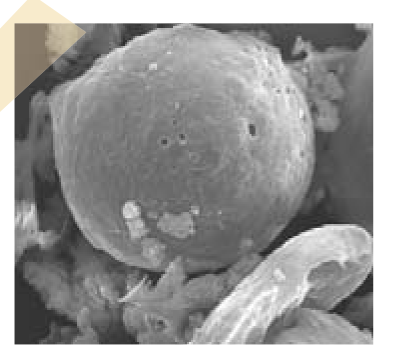
trata de una concentración abundante de fósiles como la de la Formación Maevarano. Para reducir el abanico de posibilidades a sólo una, recurrimos de nuevo a la tafonomía. Los lechos de huesos de Madagascar conservan restos de diferentes grupos de organismos. En ocasiones, como en el yacimiento MAD05-42, se trata de diferentes especies de dinosaurios. Otras acumulaciones ofrecen una diversidad mayor, como el yacimiento MAD93-18, que ha conservado fósiles de peces, tortugas, serpientes, cocodrilos, tres tipos de dinosaurios, aves y mamíferos. La guadaña no respetó tamaño, ni edad, ni especie, ni hábitat. Por tanto, se descarta que los depredadores, cocodrilos o dinosaurios carnívoros, fueran el agente letal, porque los depredadores actuales suelen mostrar preferencias al elegir sus presas.

Los datos desechan la enfermedad como agente etiológico. (Sin dejar de lado que cuesta mucho reconocer indicios de enfermedades en huesos fósiles.) Y, puesto que los animales murieron en diferentes momentos, tampoco podemos atribuir su muerte a catástrofes, fuesen terremotos, inundaciones o incendios. Lo que mató a estos animales actuó a lo largo del tiempo y atacó a sus víctimas una por una cuando llegaban a este río por voluntad propia. A mayor abundamiento, contamos con pruebas irrefutables de que el asesino repitió sus golpes en diferentes lugares con el mismo

3. LA SEQUIA FUE LA CULPABLE. Los animales se concentraban en los lechos secos de los ríos, donde morían a medida que el agua y la comida se agotaban. El dinosaurio *Majungatholus*, imponente, se comía los cadáveres de *Rapetosaurus* (*en primer plano*) e incluso de animales de su misma especie (*al fondo a la izquierda*). Las aves (*Rahonavis*) carroñeaban también los esqueletos. La causa inmediata de la muerte podía ser la deshidratación, el calor, la malnutrición y el envenenamiento, ya que el agua estancada se pudría. Otros animales carnívoros e insectos se alimentaban de estos esqueletos, hasta que las lluvias torrenciales desencadenaban las avenidas de barro que los enterraron y han persistido, fosilizados, desde hace 70 millones de años.

modus operandi. Estos animales no fueron víctimas de un día de mala suerte en el Cretácico superior; hubo muchos días de mala suerte.

Cuando logramos reunir todas las pruebas, el veredicto resulta inapelable: la sequía. Se trataba de un ecosistema subtropical, con indicios inequívocos de períodos estacionales de aridez. Los animales acudirían en tropel, sedientos, a los cauces secos de los ríos, en busca de alguna charca, para morir poco a poco a medida que el agua potable y los alimentos se agotaban. Lo observamos hoy en Africa y en el interior de Australia: se producen sequías mortíferas que conducen a los animales a juntarse alrededor de los pocos recursos que quedan. Durante un período prolongado de sequía pueden sucumbir miles de individuos donde buscaban la última gota de agua; los cadáveres se acumulan allí, a veces durante años.



4. LAS ESPORAS DE ALGAS que se han encontrado en las rocas matrices de los huesos fósiles indican la posible toxicidad del agua de las menguantes charcas.

La investigación sobre la mortalidad vinculada a sequía ratifica, en ejemplos de nuestros días, que los desafortunados animales de los yacimientos de Maevarano quedaron expuestos a causas últimas de muerte muy diversas: deshidratación, calor, la malnutrición e incluso envenenamiento, porque el agua estancada se pudre. Tenemos indicaciones fascinantes de la posible presencia de algas en las aguas estancadas donde se reunían estos animales. Michael Zavada, de la Universidad estatal de Tennessee Oriental, experto en polen del Cretácico, ha aislado microesporas de algas en rocas matrices de fósiles. Debe confirmarse, sin embargo, que la presencia de estas esporas guarda relación con la floración de algas tóxicas.

Pero, ¿cuál es la razón por la que los fósiles animales se han conservado de forma tan exquisita? Los restos orgánicos suelen conservarse muy mal en la superficie, donde se encuentran a merced de los carroñeros y donde el Sol, de forma lenta pero continua, quema la superficie de los huesos hasta convertirlos en esquirlas, hasta dejarlos en polvo. Para una preservación duradera, el enterramiento debe producirse poco después de la muerte del animal. Podríamos decir que, desde la perspectiva de un fósil, un enterramiento rápido es la clave de su inmortalidad.

RAUL MARTIN (*arriba*); MICHAEL ZAVADA *Universidad estatal de Tennessee Oriental* (*abajo*)



Por suerte para los que estudiamos estos fósiles, intervino un sepulturero muy eficaz, coordinado con el clima letal. Las sequías que periódicamente traían el desastre a los cauces resecos no eran eternas. Cuando regresaban las lluvias, y lo hacían torrencialmente, se producían avenidas de lodo. La erosión de las lluvias provocaba la llegada de masas viscosas de agua encenagada que cubrían y enterraban los huesos. Las características sedimentarias de nuestras acumulaciones de huesos apuntan a un tipo especial de flujo, libre de turbulencias, donde el agua y el sedimento se mueven convertidos en una masa casi plástica. Este tipo de flujo es común hoy. Un ejemplo muy reciente son las avalanchas letales de barro que en 2005 produjo el huracán Stan en Guatemala.

Una y otra vez, cobrado su peaje por las sequías, tornarían a correr espesos ríos de barro, corrieron sobre esqueletos y huesos dispersos de animales muertos hacía minutos o meses. Los enterraron en tumbas sedimentarias, protectoras y permanentes. Y en ellas han permanecido 70 millones de años, hasta que las tumbas se abrieron y revelaron una historia apasionante.

Los autores

Raymond R. Rogers y **David W. Krause** vienen excavando y estudiando desde 1996 los yacimientos fosilíferos de Madagascar. Rogers comparte la docencia en el departamento de geología en el Colegio Macalester con la investigación en el Museo Field de Chicago y el Museo de la Ciencia de Minnesota. Krause, profesor del departamento de ciencias anatómicas de la Universidad de Stony Brook, es también investigador del Museo Field. Las estancias de Krause en Madagascar, el cuarto país más pobre del mundo, le han llevado a crear la Fundación Madagascar Ankizy, una organización sin ánimo de lucro que construye escuelas y proporciona asistencia sanitaria a niños en regiones remotas de la isla.

Bibliografía complementaria

MONSTERS OF MADAGASCAR. John Flynn y David Krause en *National Geographic*, vol. 198, n.º 2, págs. 44-57; agosto 2000.

CANNIBALISM IN THE MADAGASCAN DINOSAUR *MAJUNGATHOLUS ATOPUS*. Raymond R. Rogers, David W. Krause y Kristina Curry Rogers en *Nature*, vol. 422, págs. 515-518, 3 de abril, 2003.

THE NATURAL HISTORY OF MADAGASCAR. Dirigido y traducido por Steven M. Goodman y Jonathan P. Benstead. University of Chicago Press, 2004.


METANO,
plantas y

cambio climático

El reciente, y sorprendente, descubrimiento de que las plantas producen metano no arroja dudas sobre las causas del calentamiento global. Son las actividades humanas, no los vegetales, el origen del aumento del metano y otros gases de invernadero

Frank Keppler y Thomas Röckmann

¿Qué ha de hacer un científico cuando descubre algo que contradice a los libros? Tuvimos que enfrentarnos a este problema cuando nuestros experimentos demostraron en 2005 que la vegetación viva produce metano, un gas de efecto invernadero. Se daba por cierto que sólo fabrican este gas las bacterias que medran sin oxígeno (anaeróbicas). Nuestros ensayos, sin embargo, descubrieron inesperadamente que las plantas producen también metano, y no en pequeñas cantidades.

Lo primero que hicimos fue buscar posibles errores en el diseño del experimento, cualquier proceso imaginable que pudiera habernos confundido. Seguros ya de la validez de los resultados, comprendimos que habíamos encontrado algo muy especial. Pensamos entonces en sus consecuencias y en la manera de informar a los demás investigadores. Con el trabajo que nos había costado aceptar este descubrimiento, nos parecía casi imposible intentar convencer a los colegas y al público. Sobre todo, porque teníamos que explicar cómo había sido posible que tantos investigadores dedicados al metano y al estudio del cambio climático no reparasen durante décadas en una fuente de tal importancia.

Gas natural

Al metano (de fórmula química CH_4) suele llamársele gas natural. Obtenido de yacimientos de petróleo, minas de carbón y campos de gas natural, el metano se ha convertido en una importante fuente de energía, y es muy probable que lo siga siendo, dadas las limitadas reservas de crudo en el planeta. Cada año se emiten a la atmósfera alrededor de 600 millones de toneladas de este gas, tanto de origen natural como humano. Se creía que en su mayoría procedían de la degradación, por bacterias anaeróbicas, de materia orgánica no fósil. Los humedales (ciénagas, marismas, arrozales) generarían la mayor fracción, pero también lo producirían los rumiantes y los termes, como subproducto de la digestión microbiana anaeróbica en sus entrañas. Asimismo, se desprende metano en los incendios de bosques y maleza, y al quemar combustibles fósiles. Al cabo de los años se ha llegado a conocer bastante bien el ciclo global del metano. En 2001, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) admitió que probablemente se habían determinado las principales fuentes del mismo, aunque todavía no podía asegurarse en qué proporción contribuía cada una.

No obstante, ciertas observaciones tenían difícil explicación. Por ejemplo, continuaba el enigma de las grandes fluctuaciones del metano en la atmósfera durante las eras glaciales y cálidas, tal y como se deduce de las burbujas de aire atrapadas en el interior del hielo. Pero en 2001 ningún científico habría tomado en consideración la emisión directa de metano por las plantas, porque nadie creía posible la producción biológica de metano, salvo a través de procesos microbianos anaeróbicos.

El metano es un gas de invernadero sumamente eficaz; por ello resulta esencial conocer sus fuentes generadoras y las cantidades que emiten. Son mucho mayores las emisiones anuales de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, pero un kilogramo de metano calienta la Tierra 23 veces más que un kilogramo de dióxido de carbono. En los últimos 150 años, las actividades humanas casi han triplicado las concentraciones de metano en la atmósfera.

KENN BROWN

¿Seguirán aumentando durante el siglo XXI? ¿Cómo podríamos reducir las emisiones? Los climatólogos tienen que responder esas preguntas; necesitamos, pues, saber el origen y el destino de este importante gas.

Hallazgos inquietantes

La idea de explorar las emisiones de metano en las plantas surgió de nuestras investigaciones sobre el clorometano, un gas clorado destructor del ozono, que se creía procedente de los océanos y los incendios forestales. Hace pocos años, en el Departamento de Agricultura y Ciencias de la Alimentación de Irlanda del Norte, descubrimos que las plantas viejas aportan la mayor parte del clorometano presente en la atmósfera. Puesto que durante la combustión de biomasa se desprende metano, además de clorometano, nos preguntamos si los vegetales no liberarían también metano.

En busca de respuesta, recogimos hojas y hierbas de 30 clases diferentes, de zonas tropicales y templadas, y las introdujimos en pequeñas cámaras con las concentraciones de oxígeno atmosférico comunes. Nos sorprendió comprobar que todas esas hojas y residuos vegetales producían metano. Lo corriente es que un gramo de materia vegetal seca desprenda entre 0,2 y 3 nanogramos (10^{-9} gramos) de metano a la hora. Registrar cantidades tan minúsculas es dificultoso, incluso con los avanzados equipos de alta sensibilidad a nuestro alcance.

La tarea era aún más complicada por tener que diferenciar entre el metano producido por el tejido vegetal y los altos niveles que normalmente existen en la atmósfera. (En nuestra opinión, es esta dificultad la que impidió la observación anterior del fenómeno.) El secreto de nuestro hallazgo consistió en suprimir el efecto perturbador del fondo natural de metano. Antes de iniciar cada prueba, reemplazábamos el aire de las cámaras por aire exento de metano, para así poder medir el metano desprendido por el tejido vegetal.

Despertada nuestra curiosidad, emprendimos experimentos similares con plantas vivas y encontramos que los índices de producción de metano subían espectacularmente, entre 10 y 100 veces los de las hojas arrancadas de plantas. Mediante una serie de pruebas descartamos la posibilidad de que el metano fuese producido por bacterias anaeróbicas. Al final, nos convencimos plenamente: las plantas desprenden metano en cantidades apreciables. No podíamos dar respuestas inmediatas acerca de su mecanismo de producción, aunque sospechamos que interviene la pectina, una sustancia presente en las paredes de las células vegetales. Dejamos la cuestión para investigaciones ulteriores, que ya están en curso. Sin embargo, dado el papel del metano en el cambio climático, comprendimos que era esencial examinar cuánto gas emite a la atmósfera esta fuente recién descubierta.

¿En qué medida podrían contribuir las plantas a la totalidad del metano en el planeta? De inmediato, era obvio que, aunque una hoja sólo aporte minúsculas cantidades de metano, estos diminutos sumandos pronto adquirirán importancia, habida cuenta de la extensa cobertura vegetal del globo. Pese a todo, nos asombró la cifra que arrojaban nuestros cálculos: entre 60 millones y 240 millones de toneladas de metano al año provienen de las plantas, es decir, del 10 al 40 por ciento de las emisiones globales anuales. La mayor parte, casi dos tercios, procede de la zona tropical, rica en vegetación. Sabíamos, por supuesto, que las estimaciones globales basadas en mediciones de laboratorio, forzosamente limitadas, están sujetas a error. En todo caso, el número final nos parecía desmesurado; y si para nosotros era una sorpresa, para muchos de nuestros colegas sería una verdadera herejía.

Por fortuna, pronto contamos con un apoyo inesperado: el de un grupo de geofísicos de Heidelberg, que observaban desde el espacio la atmósfera terrestre. Las imágenes tomadas por satélite en 2005 revelaban "nubes" de metano suspendidas sobre los bosques tropicales. Concluyeron que el balance global del metano, si se atenía a las teorías vigentes, no podía explicar el fenómeno. A la luz de nuestros hallazgos, sin embargo, el resultado era razonable: la vegetación verde originaba las nubes de metano.

Recientemente hemos obtenido un nuevo respaldo, el de Paul J. Crutzen, ganador del premio Nobel en 1995, y sus colaboradores. Tras la publicación de nuestros descubrimientos en enero de 2006, volvieron a analizar las mediciones de muestras de aire que habían tomado en la sabana de Venezuela en 1988, y calcularon que en aquellas regiones la vegetación podría haber desprendido de 30 millones a 60 millones de toneladas de metano. Crutzen comentó entonces que podrían haberlo descubierto en 1988, pero perdieron la oportunidad al dar por seguro que el metano sólo se producía en condiciones anaeróbicas.

Pese a este favorable testimonio, muchos científicos siguen sin creer que las plantas emitan metano, y menos aún aceptan nuestras evaluaciones de las cantidades de metano procedentes de la vegetación. De ahí que algunos estén calculando de nuevo el balance de las emisiones vegetales. Para ello siguen métodos diferentes de los nuestros, pero aplican los mismos índices de emisión que utilizamos nosotros. Por supuesto, esperamos vivamente que nuestros hallazgos de laboratorio se confirmen por caminos independientes.

Resumen/*Sorpresa de la naturaleza*

- Se ha tenido por cierto que el metano (gas natural) lo producen bacterias que medran sin oxígeno, pero los experimentos del equipo de los autores descubrieron que las plantas generan también ese potente gas de invernadero.
- Aunque este inquietante hallazgo pueda explicar muchas observaciones que antes desconcertaban, numerosos científicos mantienen su escepticismo, en particular en lo que se refiere a la cantidad de metano que generan las plantas. Como el metano retiene el calor en la atmósfera, importa saber cuáles son sus fuentes y las cantidades que emiten.
- Por una interpretación errónea del descubrimiento muchos pensaron que los bosques contribuían al calentamiento global. Sin embargo, los autores insisten en que las plantas no han participado en el reciente aumento del metano atmosférico, ni en el calentamiento global.

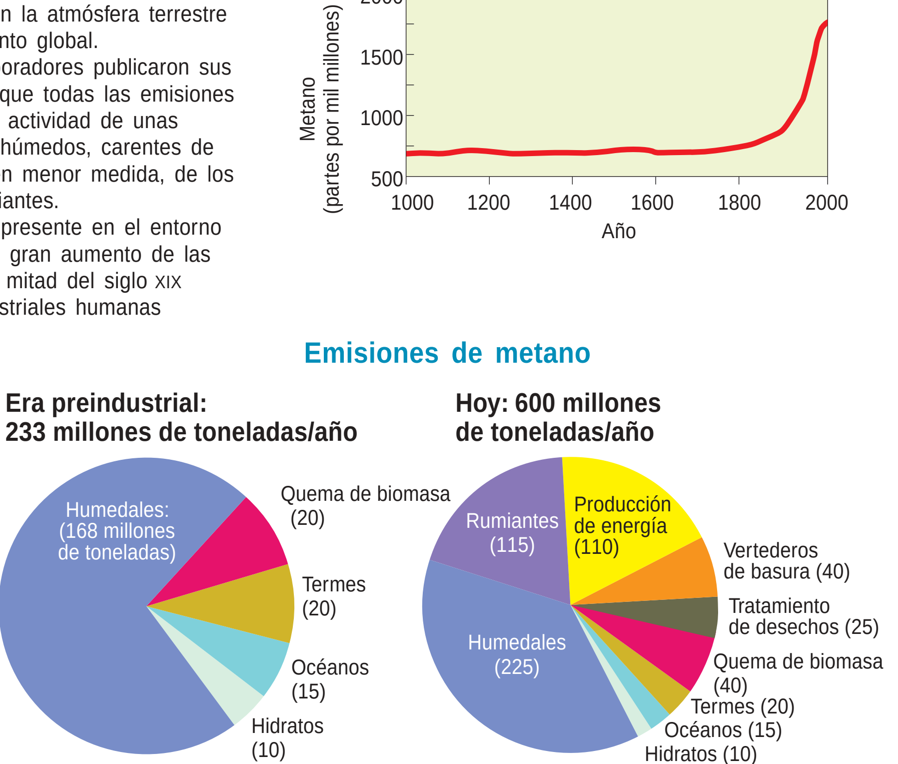
LA TEORIA CLASICA

En los 150 últimos años, las emisiones de metano a la atmósfera se han triplicado casi (*gráfica*). Hoy se envían al aire alrededor de 600 millones de toneladas al año. Este ascenso preocupa, porque el metano, a semejanza del dióxido de carbono, atrapa el calor en la atmósfera terrestre y, por tanto, contribuye al calentamiento global.

Hasta que los autores y sus colaboradores publicaron sus hallazgos, la teoría vigente sostenía que todas las emisiones naturales de metano provenían de la actividad de unas bacterias que proliferan en entornos húmedos, carentes de oxígeno —ciénagas, arrozales—, y, en menor medida, de los sistemas digestivos de termes y rumiantes.

El análisis de las fuentes del gas presente en el entorno indicaba (*sectores del círculo*) que el gran aumento de las concentraciones de metano desde la mitad del siglo XIX era resultado de las actividades industriales humanas (producción de energía por combustibles fósiles) y del incremento de los cultivos de arroz y la cría de ganado rumiante ligado a crecimiento demográfico. El trabajo de los autores no arroja dudas sobre esta atribución de la causa de que hayan aumentado las concentraciones de metano en la atmósfera, pero habrá que revisar la estimación de las contribuciones relativas de las diversas fuentes naturales.

Concentración de metano en la atmósfera



LAURIE GRACE Y JANA BRENNING

Solución de un viejo enigma

Lo anteriormente expuesto podría explicar una tendencia que durante años ha intrigado a los climatólogos: la correlación entre las fluctuaciones de los niveles de metano y los cambios de las temperaturas globales. Las diminutas burbujas de aire atrapadas en el interior de los hielos archivan las concentraciones relativas de los gases atmosféricos y variaciones climáticas de tiempos pasados, hasta hace casi un millón de años. En ellas se ve la estrecha relación entre las variaciones de los niveles de dióxido de carbono a lo largo del tiempo y los cambios de temperatura del planeta. En las eras glaciales las concentraciones de dióxido de carbono son bajas, para ascender en los períodos cálidos.

En general, las concentraciones de metano siguen la misma pauta que las de dióxido de carbono, aunque se desconoce la razón. Se ha intentado utilizar modelos de humedales —la única gran fuente natural de metano que se creía existente— para reconstruir las curiosas variaciones de los niveles de metano en el pasado. Pero no resulta fácil reproducir las diferencias del nivel de metano en la atmósfera observadas entre los períodos glaciales e interglaciales.

Otra explicación propuesta se refiere a la formación de hidratos de metano [*véase* "Hielo inflamable", por Edwin Suess, Gerhard Bohrmann, Jens Greinert y Edwin Lausch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2000]. Son cristales de hielo, creados en los sedimentos del fondo oceánico bajo una elevada presión y a temperatura próxima al punto de congelación, que atrapan gas metano en cantidad desconocida, seguramente muy grande. Se ha apuntado que la súbita emisión de ingentes volúmenes de metano desde estos sedimentos a la atmósfera podría haber sido la causa de rápidos calentamientos de la Tierra en el pasado remoto. Sin embargo, recientes estudios del casquete de hielo polar demuestran que los hidratos de metano marinos se mantuvieron estables durante los últimos 40.000 años, por lo menos. No tuvieron que ver, pues, con los bruscos incrementos de metano atmosférico del último período glacial.

Sabemos que la vegetación terrestre es muy sensible a las variaciones del medio. La masa total de vegetación del planeta varía con los enfriamientos y calentamientos del clima durante las eras glaciales. Teniendo en cuenta nuestros hallazgos, se deberían ahora considerar esas variaciones como posible causa de los descensos del nivel de metano en los períodos glaciales y de las subidas durante los interglaciales. En el último máximo glacial, hace cerca de 21.000 años, las selvas amazónicas sólo cubrían la mitad de su extensión actual; por tanto, la vegetación tropical debía de desprender en aquellos tiempos mucho menos metano. Desde entonces, han subido la temperatura de la superficie terrestre y las concentraciones de dióxido de carbono, con la potenciación consiguiente

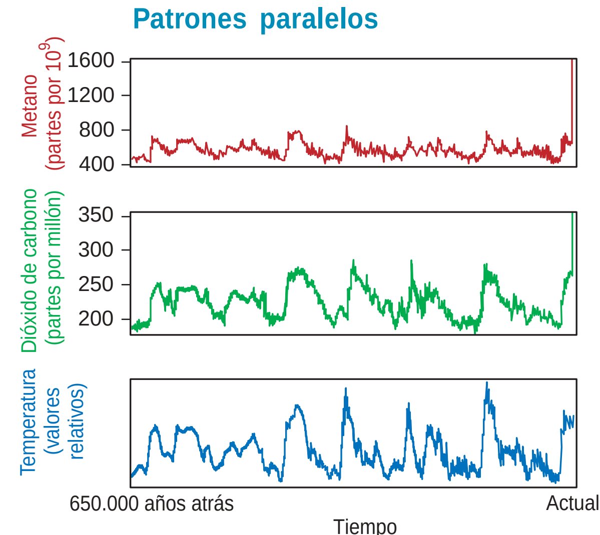
LA NUEVA TEORIA

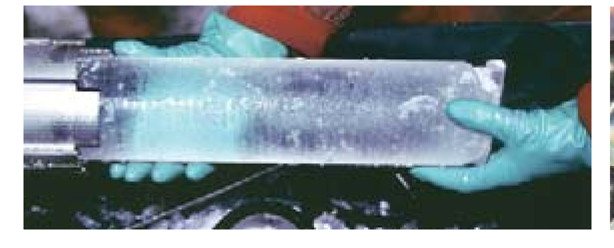
El equipo de los autores examinó en detalle los gases emitidos por desechos vegetales y plantas vivas. Para sorpresa suya, encontraron que tanto la materia vegetal muerta como la vegetación viva producen metano. Esta importante fuente de emisiones no se había tenido en cuenta hasta ese experimento, realizado en cámaras en las que se había evacuado el metano del aire para poder medir las minúsculas cantidades de gas que emiten las plantas.

La nueva teoría podría explicar las desconcertantes fluctuaciones de nivel del metano, fiel reflejo de los cambios de nivel del dióxido de carbono y de la temperatura global (*gráficas*). Mediante el estudio de las burbujas de aire atrapadas dentro de los hielos polares se ha podido conocer la composición de la atmósfera hasta hace casi un millón de años. Asimismo, las concentraciones de deuterio en el hielo nos informan de las temperaturas. Las altas concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera y el aumento de las temperaturas fueron seguramente causa de un gran desarrollo de la vegetación, al que habrían acompañado emisiones de metano muy abundantes.



1. EL EXPERIMENTO detectó las minúsculas cantidades de metano que producía la vegetación (*césped en la fotografía*).







2. EL TESTIGO DE HIELO (*más a la izquierda*) contiene burbujas que revelan la composición de la atmósfera antigua. En la microfotografía de una pequeña sección (*izquierda*), las burbujas de gas son de color oscuro y de uno a tres milímetros de ancho.

del crecimiento de las plantas y las emisiones de metano cada vez mayores desde la masa vegetal.

Durante otros períodos de la historia del planeta habrán ocurrido episodios climáticos similares. Especialmente en extinciones masivas, como las del tránsito del Pérmico al Triásico (hace 250 millones de años) y del Triásico al Jurásico (hace 200 millones de años). Las concentraciones altísimas de dióxido de carbono, así como el ascenso de las temperaturas, quizá llevasen a un espectacular crecimiento de la biomasa vegetal. Tal vez acompañase a estos períodos de calentamiento global una masiva emisión de metano desde la vegetación y un calor más intenso. Como hipótesis, no del todo descabellada, las emisiones podrían haber sido diez veces mayores que las actuales. Y si no erramos en ello, habría que considerar que las emisiones de metano por las plantas, unidas a las de los humedales y quizá las del fondo marino, han sido una de las fuerzas impulsoras del cambio climático en la historia del planeta.

Malentendido mediático

Cuando vimos cómo se informaba de nuestro trabajo científico en el Boletín Mundial de la BBC, a continuación de las noticias sobre la gripe aviar y la situación de Irak, el mismo día en que lo comunicamos a la prensa, comprendimos que realmente interesaba a la sociedad. La impresión quedó reforzada al día siguiente, cuando apareció en periódicos de todo el mundo, a menudo en titulares de portada.

Por desgracia, la extensa cobertura mediática puede inducir a exageraciones, y esta vez dio lugar a interpretaciones erróneas de nuestros resultados. En particular, numerosos comentarios achacaban el calentamiento global a las plantas; así, por ejemplo, el titular “Calentamiento global: los bosques son culpables”, leído en la portada de un diario respetable. Al recibir numerosas llamadas y mensajes de personas que nos preguntaban si no deberían arrancar los árboles del jardín para combatir el calentamiento global, nos dimos cuenta de que algo

había fallado en la comunicación al público.

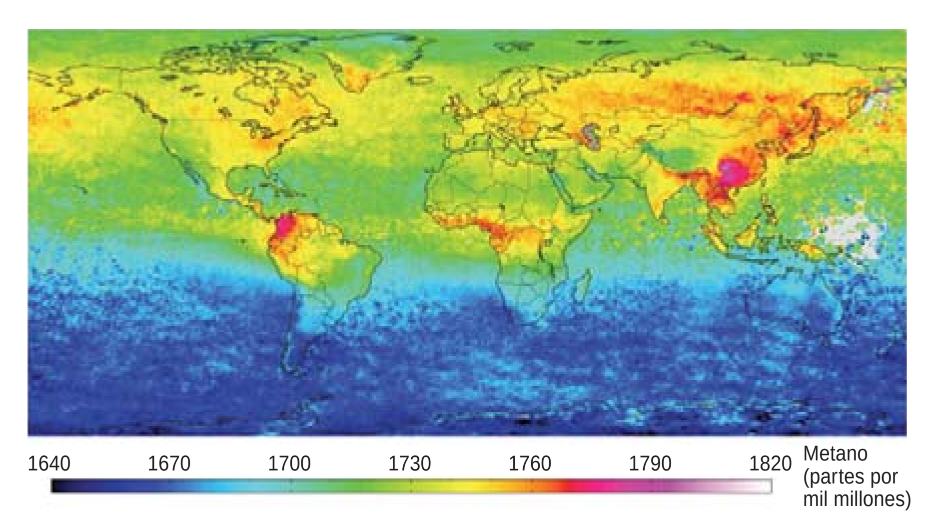
Nos sentimos obligados a emitir otra nota de prensa para corregir las falsas interpretaciones. En ese segundo comunicado insistimos en la veracidad de nuestro descubrimiento. Las plantas llevan cientos de millones de años emitiendo metano a la atmósfera. Tales emisiones han contribuido al efecto de invernadero natural, sin el cual no habría sido posible la vida que hoy conocemos. Sin embargo, las plantas no tienen la culpa del espectacular aumento de las concentraciones de metano desde los principios de la industrialización. Este fuerte crecimiento sin duda se ha debido a las actividades humanas.

Nuestro descubrimiento ha suscitado también el temor a que las emisiones de metano por las plantas pudieran debilitar el efecto positivo del almacenamiento de carbono por los programas de reforestación (o incluso invertirlo.) Si así ocurriese, tendría graves repercusiones en los países que intentan cumplir el Protocolo de Kyoto de reducción de las emisiones mundiales de carbono, puesto que, según este protocolo, plantar árboles favorece las estrategias nacionales de mitigación del dióxido de carbono. Nuestros cálculos demuestran, sin embargo, que los beneficios climáticos aportados por la creación de nuevos bosques que absorben dióxido de carbono superan muy ampliamente el efecto negativo, relativamente pequeño, de añadir metano a la atmósfera (que sólo contrarrestaría un 4 por ciento, como máximo, de la captación total de carbono por los árboles). El potencial reductor del calentamiento global que ofrece la plantación de árboles es, sin la menor duda, positivo.

En el ardor de este debate se olvidó un hecho esencial: las plantas son el pulmón verde de nuestro planeta y aportan el oxígeno que sustenta la vida tal y como la conocemos. Además, desempeñan muchas otras funciones beneficiosas. Basten dos ejemplos destacados: el control del ciclo hidrológico tropical y la formación de un entorno natural que fomenta la biodiversidad. Las plantas no crean el problema; lo crea la quema de combustibles fósiles a gran escala.

Es más razonable preocuparse por el posible efecto del metano de origen vegetal sobre el clima en un futuro próximo. Aunque no sea imputable a las plantas el enorme aumento de metano en la atmósfera desde la era preindustrial, lo cierto es que en las presentes circunstancias la vegetación tiende a crecer más deprisa. Si, como esperamos, a mayor temperatura las plantas generan más metano, el calentamiento se intensificará. Se crea así un círculo vicioso, que sería un fenómeno natural si no fuese porque se va acelerando por actividades antropogénicas, sobre todo por la quema de combustibles fósiles. Cabe suponer que en el pasado las plantas ejercieron un poderoso efecto estabilizador sobre el cambio climático global, que hoy tal vez no sería posible al haber deforestado extensiones tan vastas.

Aunque sea prematuro precisar la influencia de nuestro hallazgo sobre las predicciones de cambio climático en un futuro más lejano, está claro que cualquier análisis nuevo deberá considerar el metano que emite la cubierta vegetal del planeta.



LAS IMAGENES POR SATELITE de la atmósfera terrestre respaldaron el discutido descubrimiento de los autores. En 2005 se observaron nubes de metano sobre los bosques tropicales. La teoría común de generación del metano no podía explicarlas; en cambio, el hallazgo de los autores sí daba una explicación convincente del fenómeno: la abundante vegetación de los trópicos era la fuente emisora de metano.

DE "SATELLITE CHARTOGRAPHY OF ATMOSPHERIC METHANE FROM SCIAMACHY ON BOARD ENVISAT: ANALYSIS OF THE YEARS 2003 AND 2004", POR C. FRANKENBERG ET AL., EN *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 111; 2006

Los autores

Frank Keppler y Thomas Röckmann descubrieron que las plantas emiten metano en el Instituto Max Planck de Física Nuclear, en Heidelberg. Keppler se doctoró en geoquímica ambiental por la Universidad de Heidelberg en 2000. Se le ha concedido un premio para investigadores jóvenes europeos, gracias al cual va a formar su propio equipo de investigación en el Instituto Max Planck de Química en Maguncia. Röckmann es profesor del Instituto de Investigación Marina y Atmosférica de Utrecht.

Bibliografía complementaria

UNA ATMÓSFERA CAMBIANTE. Thomas E. Graedel y Paul J. Crutzen en *Investigación y Ciencia*, n.º 158, págs. 22-31; noviembre de 1989.

CLIMATE CHANGE 2001: THE SCIENTIFIC BASIS. Preparado por J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell y C. A. Johnsson. Cambridge University Press, 2001.

METHANE EMISSIONS FROM TERRESTRIAL PLANTS UNDER AEROBIC CONDITIONS. Frank Keppler, John T. G. Hamilton, Marc Brass y Thomas Röckmann en *Nature*, vol. 439, págs. 187-191; 12 de enero, 2006.

METHANE FINDING BAFFLES SCIENTISTS. Quirin Schiermeier, misma revista, pág. 128.

La rana patilarga y los salmónidos introducidos
en una población de montaña

Los anfibios son los vertebrados más amenazados. Casi un tercio de sus especies corre grave peligro. Una de las causas de esta situación es la introducción de peces donde antes no los había. En general, las larvas de anfibios carecen de defensas eficaces frente a los peces depredadores; necesitan hallarse lejos de su alcance para sobrevivir. Una separación espacial que puede ocurrir a diferentes escalas: hábitats, masas de agua, cuencas, etcétera. Tales hiatos desaparecen con la introducción de peces.

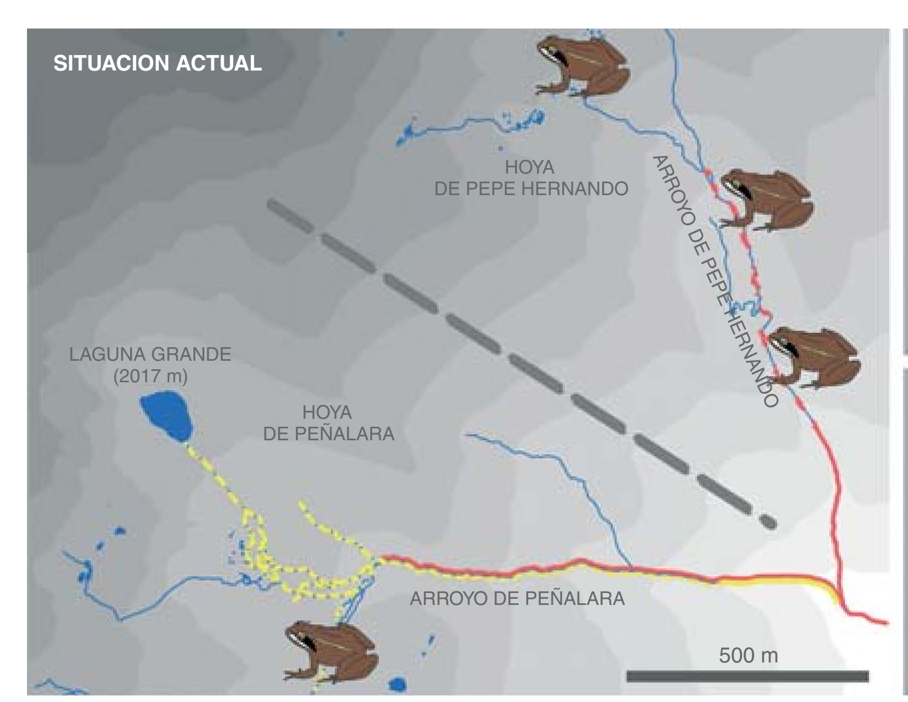
En charcas y lagunas hallamos pruebas numerosas de los efectos negativos ejercidos por los peces. Comparada con esa información, resultan escasos los conocimientos recabados sobre el impacto por ellos ejercido sobre los anfibios de arroyos y ríos. Con todo, la geografía propia de las redes fluviales y la direccionalidad de los cursos de agua corriente confieren a las introducciones características particulares que es preciso entender para prevenir o mitigar sus consecuencias.

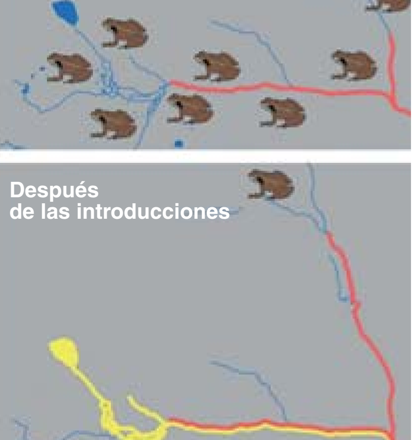
La rana patilarga (*Rana iberica*) es un endemismo ibérico que habita sobre todo en el noroeste de la Península. En el centro medra sólo en las sierras de Gredos y Guadarrama. Busca aguas frías y bien oxigenadas. Con frecuencia vive en arroyos pequeños que, por su alta pendiente o poco caudal, no ocupan los peces, pero puede convivir con la trucha común (*Salmo trutta*) en ríos de mayor tamaño. En esos casos, existe una clara segregación espacial; las larvas de rana patilarga se refugian en zonas someras de las orillas, que las truchas evitan.

La rana patilarga tolera mal la contaminación y la presencia humana. En los últimos años, la especie ha experimentado un fuerte retroceso en la sierra de Guadarrama, probablemente debido a la creciente presión antrópica y a la introducción de salmónidos.

El Parque Natural de Peñalara, en el corazón de la sierra de Guadarrama, alberga una población de *Rana iberica* que, pese a encontrarse en un espacio protegido, no ha escapado a estos impactos. Antes de su declaración como Parque Natural, se introdujo el salvelino (*Salvelinus fontinalis*), un salmónido americano, en la Laguna Grande de Peñalara. Se produjeron también sueltas incontroladas de la trucha común, nativa, en la zona media-alta del Arroyo de Pepe Hernando.

El salvelino colonizó la Laguna Grande y, desde ésta (situada en la cabecera de la red fluvial), se extendió aguas abajo, para asentarse en los arroyos de la Hoya de Peñalara hasta su confluencia con el Arroyo de Pepe Hernando. La trucha estableció una población en una zona originariamente sin peces del Arroyo; por fortuna, su dispersión aguas





1. Distribución de la rana patilarga y las dos especies de salmónidos en el Parque Natural de Peñalara antes de que se produjeran las introducciones de peces (*arriba a la derecha*), después de dichas introducciones (*abajo a la derecha*) y hoy, tras varios años de trabajo en la zona. En color rojo se muestran los tramos de arroyo con presencia de trucha y, en color amarillo, de salvelino.



2. Ejemplar de rana patilarga del Parque Natural de Peñalara.

arriba fue bloqueada por obstáculos naturales, que no habían sido barrera para la expansión corriente abajo del salvelino en la Hoya de Peñalara.

Tras estas introducciones la rana patilarga desapareció del tramo afectado del Arroyo de Pepe Hernando y de la totalidad de la Hoya de Peñalara, donde el impacto adicional del alto número de visitantes pudo ser otro factor negativo. La población de rana patilarga del Parque quedó reducida a un pequeño núcleo en la zona alta del Arroyo de Pepe Hernando y otro en la zona donde, tras la confluencia de éste y del arroyo de Peñalara, se forma un curso más ancho con orillas someras que permite la coexistencia de truchas y ranas.

Al examinar el uso del hábitat por las larvas de rana y los dos salmónidos, hallamos que unas y otros preferían las pozas. En pequeños arroyos, estas zonas presentan profundidad suficiente para los peces, en verano sobre todo; además, su agua lenta resulta adecuada para los renacuajos. Los renacuajos se hallaban restringidos a zonas con velocidad de corriente < 15 cm/s, mientras que eran bastante indiferentes respecto a la profundidad y el substrato del fondo. Un ulterior experimento demostró que la corriente de 15 cm/s arrastraba más de la mitad de los renacuajos y la de 20 cm/s los arrastraba a todos.

Comprobamos también que las larvas de rana patilarga respondían al olor de ambos salmónidos con un descenso notable de sus movimientos. Ello dificultaría su detección por parte de estos depredadores visuales. Pero semejante comportamiento no parece evitar por sí solo la depredación de las larvas, si han de estar muy próximas a los salmónidos, como ocurre en las pozas de arroyos pequeños de la zona alta del Parque. La estrategia, sin embargo, podría contribuir a la coexistencia si mediara cierto grado de segregación espacial, posible en ríos de mayor tamaño.

Para mitigar los efectos de las introducciones, estamos retirando, mediante pesca eléctrica, salvelinos en la Hoya de Peñalara desde 2003 y truchas (que trasladamos a su área natural de distribución) en el Arroyo de Pepe Hernando desde 2002. Afortunadamente, en 2006 se observaron ya larvas de rana en toda la zona del Arroyo de Pepe Hernando donde antes se habían introducido las truchas. Además, las capturas de salvelinos han descendido a un 8 % y las de trucha a un 25 % de las iniciales, y en varios cursos no hubo reproducción, lo que sugiere que las poblaciones de salmónidos están próximas al colapso. Campañas anteriores de instalación de redes por parte del equipo gestor del Parque eliminaron el salvelino de la Laguna Grande y, por tanto, el riesgo de nueva invasión.

Sin embargo, la rana sólo puede recolonizar la Hoya de Peñalara a través del tramo aguas abajo de ésta, donde el salvelino no abunda. Por ello, y hasta su completa erradicación, hemos iniciado traslocaciones de larvas de rana patilarga a arroyos temporales de la Hoya de Peñalara. A ellas se añadirán ejemplares criados en cautividad en el próximo centro de recuperación de anfibios del Parque que la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid gestiona junto con el Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC) y el Durrell Wildlife Conservation Trust.

Nuestra investigación ha mostrado el efecto de la introducción de peces en anfibios de arroyos. Ha corroborado que el impacto ejercido viene modulado por la geografía y la estructura del hábitat. Por fin, nuestro trabajo revela la eficacia de las medidas paliativas que incorporan esa información a la hora de recuperar la población de rana patilarga de Peñalara.

JAIME BOSCH y PEDRO A. RINCÓN
Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid

El neumococo

Mecanismo patogénico

Streptococcus pneumoniae, el neumococo, constituye uno de los patógenos más importantes del hombre, con quien, no obstante, convive de forma inocua en un estado de transporte. La bacteria coloniza la nasofaringe de hasta el 40 por ciento de los niños y los adultos sanos.

El neumococo ataca, sobre todo, en etapas tempranas y tardías de nuestra vida, cuando desencadena la enfermedad invasiva. Así, el neumococo es el agente etiológico más común en neumonías, meningitis bacterianas, otitis media y sepsis. Constituye una de las principales causas de muerte por infección en el mundo. Los tratamientos suelen basarse en la penicilina y sus derivados; sin embargo, la cada vez más abundante resistencia a los antibióticos ha intensificado la búsqueda de nuevas estrategias terapéuticas.

Si bien se conocen algunas de las biomoléculas implicadas en la patogénesis pneumocócica, queda mucho por desentrañar sobre el mecanismo molecular de las interacciones entre bacteria y huésped. Actualmente ya podemos empezar a vislumbrar la función de los componentes estructurales del neumococo en los mecanismos patogénicos.

En 1925, Oswald T. Avery demostró que la cápsula que rodea al neumococo estaba formada por

polisacáridos (azúcares). Las distintas composiciones moleculares de la cápsula dan lugar a los cerca de 90 serotipos conocidos de neumococo. Esta estructura capsular resulta fundamental para la virulencia: si bien no interviene de forma directa en las fases de adherencia, invasión o inflamación producidas por la bacteria, la cápsula evita, en mayor o menor grado según su composición, la fagocitosis del neumococo por el sistema inmunitario.

Bajo esta cápsula de polisacáridos se encuentra la pared celular del neumococo, una estructura dinámica que consta de un esqueleto glicánico (azúcares) y más de una docena de péptidos diversos; de ahí su nombre de peptidoglicano. La pared contiene también ácidos teicoicos: polímeros dotados de carga (en forma de columnas flexibles) que, en el caso del neumococo y otros patógenos respiratorios, tienen unidos a ellos moléculas de fosforilcolina.

La fosforilcolina constituye la diana de la proteína C reactiva (CRP). La CRP se sintetiza en los humanos cuando se produce una infección o inflamación aguda; reacciona con el sistema del complemento humano (sistema de defensa contra agresiones externas, sobre todo bacterianas). La fosforilcolina está presente también en nuestro organismo: es uno de los componentes mayoritarios del surfactante pulmonar.

No es de extrañar, por tanto, que la fosforilcolina del neumococo desempeñe una función crucial en la patogénesis. En primer lugar, facilita la invasión bacteriana de las células epiteliales respiratorias: la fosforilcolina se une al receptor del factor de activación de plaquetas (PAF). En segundo lugar, la fosforilcolina actúa como molécula de anclaje para toda una familia de proteínas de la superficie del neumococo, las proteínas de unión a colina (CBP, de "choline-binding proteins").

Las proteínas de unión a colina son proteínas modulares; constan de varios módulos, cada uno con estructura y función distintas. Uno de ellos, formado por repeticiones de bloques de unos 20 aminoácidos, facilita el anclaje de la proteína en la pared del neumococo a través de las moléculas de colina presentes en los ácidos teicoicos del neumococo. Otro módulo es el responsable de la actividad funcional específica de la proteína.

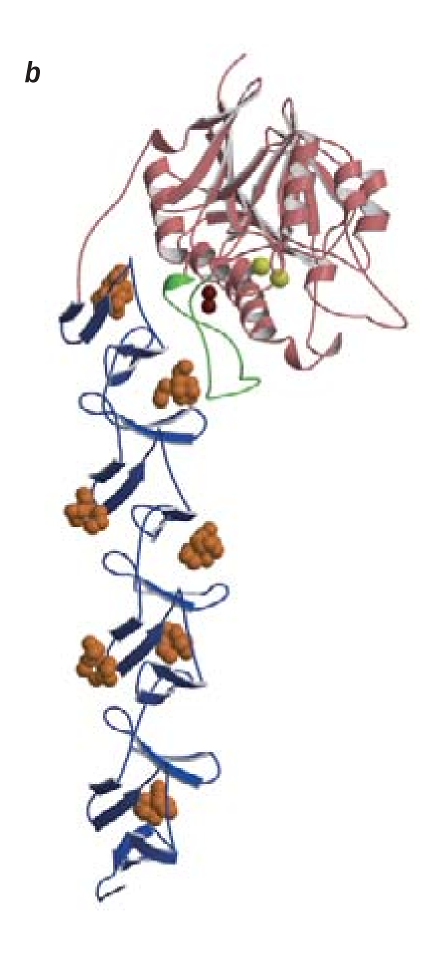
A esta familia de proteínas de unión a colina pertenecen importantes factores de virulencia del neumococo, implicados en la adhesión celular y colonización. Citemos la fosforilcolina esterasa (Pce), asociada al proceso de colonización bacteriana. Esta enzima es peculiar, ya que, mientras su módulo de anclaje se une a la colina (como toda CBP), su módulo catalítico elimina (hidroliza) esas mismas moléculas de fosforilcolina unidas a los ácidos teicoicos. La proteína Pce degrada sólo una porción (alrededor de un 30 por ciento) de todas las moléculas de fosforilcolina presentes en la pared del neumococo.

La cristalografía de rayos X permite la determinación de la estruc-

a

FOSFORILCOLINA
ESTERASA
ACIDO
TEICOICO
PEPTIDOGLICANO
MEMBRANA
CITOPLASMATICA

b



1. Pared celular del neumococo (*a*). Se ha representado el peptidoglicano (*bandas amarillas*) y una molécula de fosforilcolina esterasa (*verde*) anclada a los ácidos teicoicos de la pared. Estructura tridimensional de la fosforilcolina esterasa (*b*). Se distingue el módulo de anclaje en la pared bacteriana (*azul*), donde se encuentran los sitios de unión a colina, algunos de ellos ocupados por moléculas análogas a la colina (*esferas naranja*). En el módulo catalítico de la Pce (*salmón*) se encuentra el sitio activo con los dos cationes de zinc (*esferas amarillas*). La región que favorece la unión entre los dos módulos (*verde*) se estructura mediante dos iones de calcio (*esferas granates*).

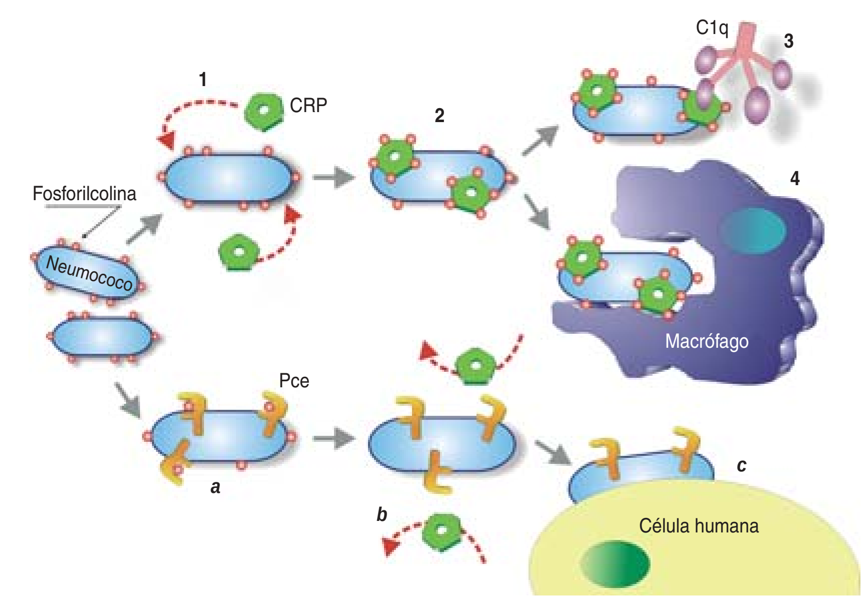
tura tridimensional de las proteínas a resolución atómica. Tras su cristalización, la muestra se expone bajo una fuente muy intensa de rayos X. Con esa técnica, hemos establecido la estructura tridimensional de Pce. Aprovechamos la fuente de radiación sincrotrón europea ESRF, de Grenoble, para determinar, por primera vez, la estructura de una CBP de neumococo.

La estructura primaria de la fosforilcolina esterasa consta de 602 aminoácidos. La enzima presenta dos módulos funcionales. El módulo catalítico corresponde a un dominio globular donde se aloja toda la maquinaria molecular encargada de la rotura del enlace entre la fosforilcolina y el ácido teicoico.

La fosforilcolina esterasa presenta otro módulo, muy alargado, que consta de diez repeticiones de 21 aminoácidos en disposición helicoidal. Entre vuelta y vuelta de hélice se forman cavidades —mediante aminoácidos especiales— que facilitan el reconocimiento de las moléculas de colina de los ácidos teicoicos. Las cavidades operan como puntos de anclaje de la proteína en la pared bacteriana.

Del análisis de la estructura tridimensional de la fosforilcolina esterasa se infieren importantes conclusiones acerca de su función. La presencia del producto de la reacción y de los análogos de colina en la estructura tridimensional ha permitido la modelización del complejo que se forma entre Pce y los ácidos teicoicos. Se ha demostrado que la eliminación de las moléculas de fosforilcolina está limitada por la conformación del centro activo. Esto nos ha llevado a una sorprendente conclusión: sólo las moléculas de fosforilcolina situadas en el extremo de las cadenas de los ácidos teicoicos son accesibles al sitio activo. Por tanto, Pce intervendría en la liberación específica de las fosforilcolinas terminales. Se mantendrían las fosforilcolinas necesarias para el anclaje de Pce (y del resto de las CBP) en la pared bacteriana.

Este resultado reviste sumo interés para el estudio del mecanismo patogénico del neumococo. La proteína CRP, en combinación con las proteínas del complemento humano, detecta las moléculas de fosforilcolina de la superficie de las bacterias invasoras y pone en funcionamiento nuestro sistema inmunitario para la eliminación del patógeno. Sin embargo —y éste constituye otro de los hallazgos de interés—, la eliminación selectiva por parte de Pce de las moléculas de fosforilcolina más externas evita el reconocimiento del patógeno por la CRP; ello confiere al neumococo una mayor posibilidad de supervivencia en el organismo humano.



2. El neumococo, una bacteria patógena, presenta fosforilcolina en su superficie. Estas moléculas de fosforilcolina son reconocidas por la proteína C reactiva humana (CRP), que cuenta con cinco sitios de unión (*1*). Las CRP se fijan al neumococo (*2*). Dos vías son ahora posibles: (*3*) la CRP sirve como anclaje en otra proteína, la C1q, que activa la respuesta inmunitaria para eliminar el neumococo o bien (*4*) la fijación de CRP facilita que los macrófagos humanos detecten al invasor y su posterior eliminación. Sin embargo, si se activa la proteína de superficie fosforilcolina esterasa (Pce), la enzima degradará la mayoría de las moléculas de fosforilcolina de la envoltura bacteriana (*a*). La CRP no reconoce entonces el neumococo, que escapa al ataque (*b*); ello facilita la colonización e infección del neumococo en células humanas (*c*).

Hemos descubierto también que la enzima Pce hidroliza otros compuestos que contienen fosforilcolina distintos de los ácidos teicoicos. En particular, degrada el factor de activación de plaquetas (PAF), un importantísimo mensajero celular que se activa en respuesta a la inflamación.

Por tanto, la estructura de Pce sugiere que esta proteína de superficie del neumococo desarrolla una función crucial en los procesos de adherencia e invasión. Por un lado, la localización externa de Pce facilitaría la eliminación del mensajero PAF del torrente sanguíneo, con el consiguiente bloqueo de la señal de alerta ante la inflamación. Por otro, la activación de la enzima Pce en determinados momentos permitiría la reducción del número de moléculas de fosforilcolina "visibles" para la CRP, lo que proporcionaría al neumococo una vía de escape ante el ataque del sistema inmunitario.

Además, la eliminación de las moléculas de fosforilcolina no es total. Por esa razón, el neumococo puede mantener sus propias CBP unidas a la pared al tiempo que conserva algunas moléculas de fosforilcolina en la superficie, que facilitan la unión al receptor de PAF y el comienzo de la invasión.

Estos resultados nos evidencian un extraordinario grado de complejidad en el proceso de colonización bacteriana, donde la fosforilcolina esterasa desarrolla una función predominante. Se abren, por tanto, nuevas vías —con repercusiones farmacológicas importantes— para investigar de qué modo este patógeno humano adapta la decoración molecular de su superficie para asegurar su supervivencia tras la infección.

JUAN A. HERMOSO
Grupo de Cristalografía
Macromolecular y Biología Estructural
Instituto de Química-Física Rocasolano
C.S.I.C., Madrid

Enrique Isla, Josep-Maria Gili y José Manuel Fortuño

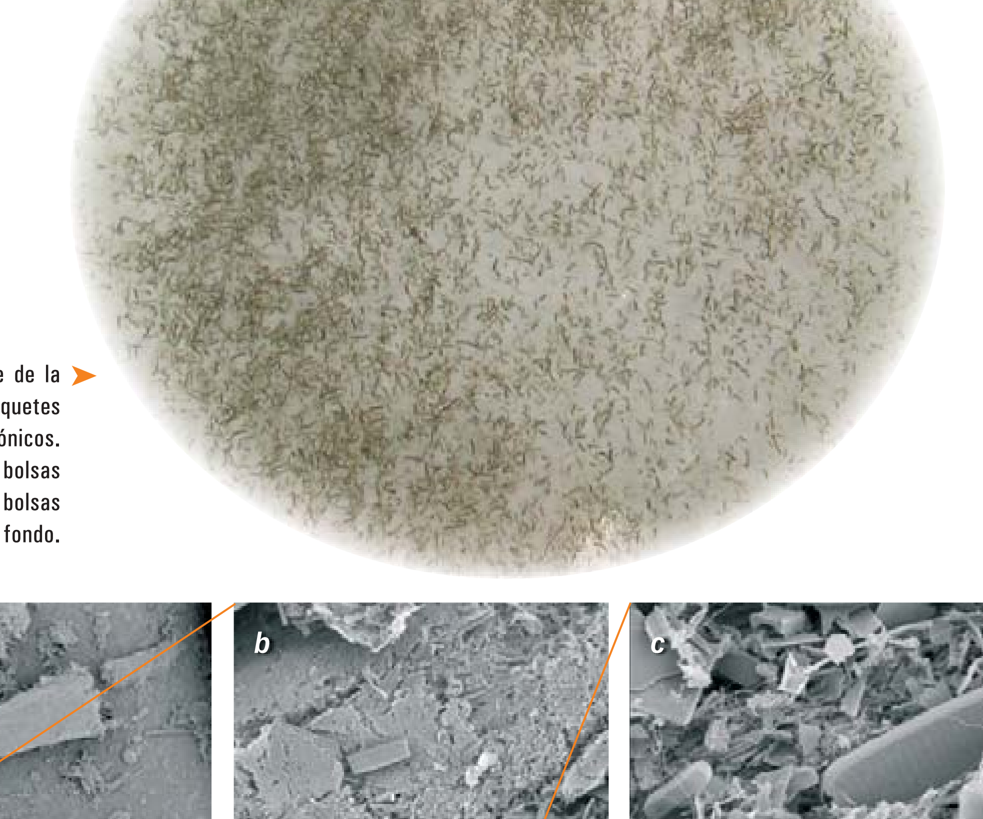
Trampas de sedimento



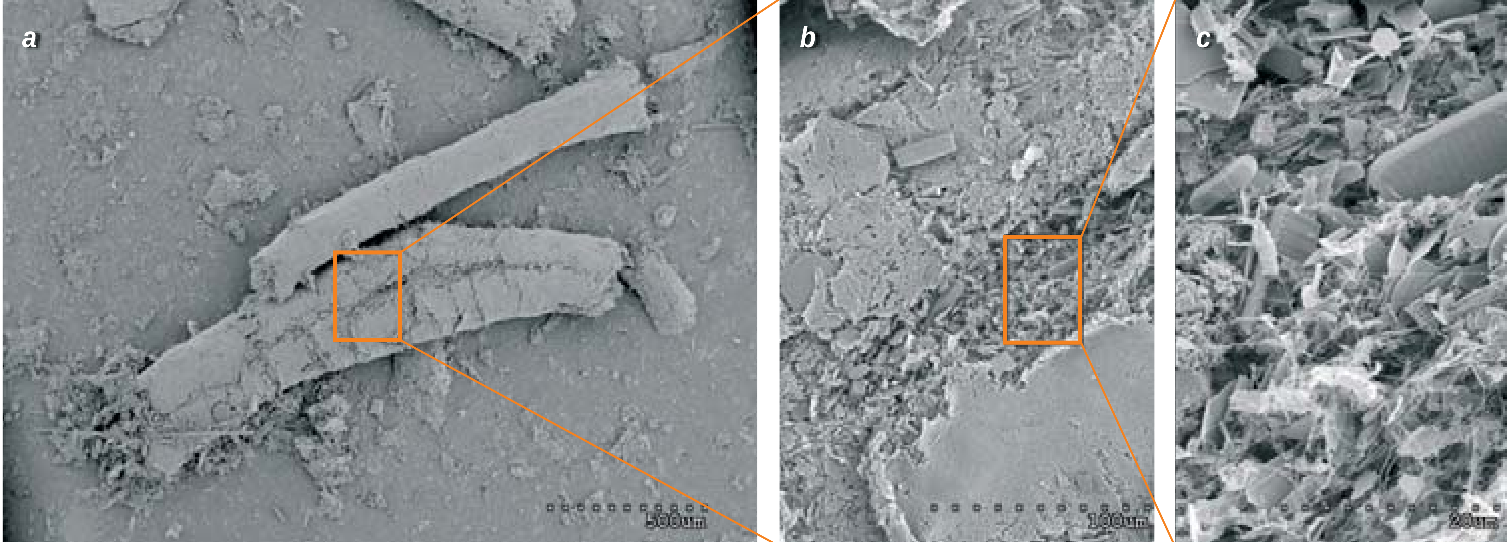
En los océanos, la cadena trófica empieza en las capas iluminadas (zona fótica). Allí, los organismos fotosintetizadores proliferan utilizando la energía lumínica del Sol y los nutrientes disueltos en el agua. En su mayoría se trata de organismos microscópicos que conforman el fitoplancton. Desde esas capas superficiales, la materia orgánica precipita hacia el fondo marino a lo largo de la columna de agua, a la par que se va transformando por distintas vías. El camino más evidente corresponde a la depredación del fitoplancton por los herbívoros, que a su vez son consumidos por carnívoros. Así se configuran las cadenas tróficas planctónicas marinas.

No toda la materia orgánica se procesa en la columna de agua; una fracción llega al fondo. Ese remanente resulta esencial para la proliferación de la vida en el lecho marino y su vecindad. Determinar la cantidad, calidad y procedencia de esos sedimentos sigue constituyendo un reto para la investigación marina. Para evaluar ese proceso de transferencia de materia se utiliza un instrumento eficaz, la trampa de sedimento: un dispositivo que atrapa en un recipiente próximo al fondo las partículas que caen desde zonas más altas de la columna de agua.

1. Trampa de sedimento. Un cono receptor en forma de embudo recoge las partículas y las almacena en un recipiente situado en la base del mismo. Suele constar de un carrusel con recipientes que se reemplazan periódicamente.

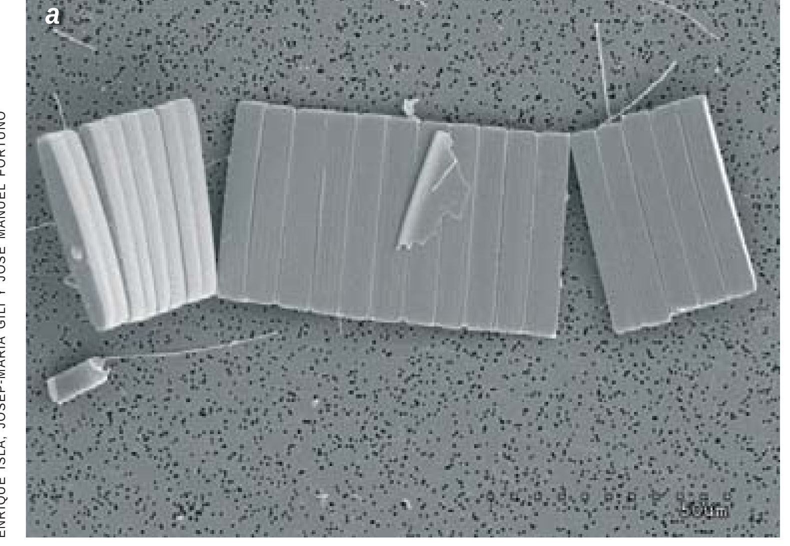


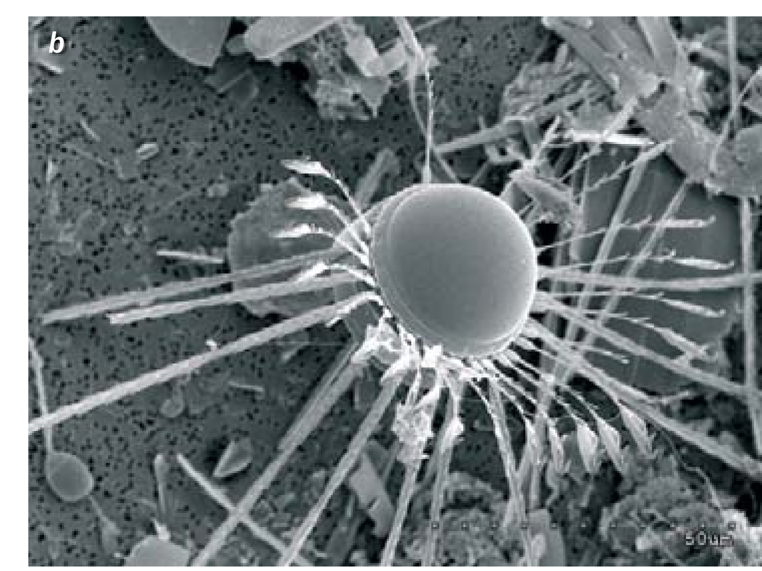
2. Contenido de un recipiente de la trampa. Se aprecian abundantes paquetes fecales de organismos zooplanctónicos. Esos herbívoros empaquetan en bolsas parte del alimento que ingieren; las bolsas se precipitan hacia el fondo.



3. Paquete fecal de unos tres milímetros de longitud proveniente de un organismo zooplanctónico (*a*). Fotografía obtenida con un microscopio electrónico de barrido. Las dos ampliaciones (*b* y *c*) muestran su contenido: microalgas que el herbívoro no ha destruido del todo. Las microalgas constituyen una fuente de alimento esencial para los organismos que habitan en el lecho marino.

4. Dos ejemplos de microalgas que han llegado al fondo sin ser consumidas por herbívoros: una cadena de diatomeas del género *Fragilariopsis* (*a*) y el fragmento de un ejemplar del género *Corethron* (*b*).





ENRIQUE ISLA, JOSEP-MARIA GILI Y JOSE MANUEL FORTUÑO

Jeffrey D. Sachs

Más allá de Kioto

Para abordar de verdad el cambio climático global, es necesario que los responsables políticos establezcan un plan de actuación que se extienda hasta finales de siglo

A finales de 2006, varios acontecimientos acercaron a EE.UU. y otros países a unas verdaderas negociaciones mundiales acerca del control de las emisiones de gases de efecto invernadero. Es oportuno, pues, preguntarse qué supondría un acuerdo mundial que no fuese letra muerta. Un sólido punto de partida es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de 1992, por la cual los firmantes se comprometían a afrontar el problema; ateniéndose a este tratado internacional se han tomado algunas medidas concretas, como el Protocolo de Kioto. Los firmantes de la Convención, los Estados Unidos y casi todas las demás naciones, declararon que el objetivo era "estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera en un nivel que evite una interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático". El Protocolo de Kioto, aprobado en 1997, no acertó demasiado al poner en práctica este propósito: abordó a corto plazo un objetivo a largo plazo y, como resultado, perdió claridad, credibilidad y respaldo. La clave ahora está en ir más allá.

Será mucho más barato controlar las emisiones que no hacer nada

El Protocolo de Kioto pide a los países con altos ingresos y a las naciones poscomunistas del Este europeo y la antigua Unión Soviética que reduzcan sus emisiones de gases de invernadero para 2012 en alrededor de un 6 por ciento con respecto a 1990. Este compromiso es mucho mejor que nada (justa descripción de la no-política de la administración Bush), pero adolece de dos grandes defectos. El primero, que deja fuera a los países en vías de desarrollo, a los que muy pronto corresponderá más de la mitad de las emisiones mundiales de gases de invernadero; sin la activa participación de China, India y otros países en desarrollo, resultará imposible estabilizar las emisiones. El segundo, que el Protocolo de Kioto asume el objetivo a largo plazo de estabilizar las concentraciones de los gases de invernadero, pero lo transforma en un objetivo a corto plazo relativo a la reducción de emisiones, sin una clara ligazón entre ambas metas. Para conseguir la estabilización habrá que llevar a cabo cambios técnicos que sobrepasarán con creces el horizonte de 2012 del Protocolo de Kioto.

Esta vez será mejor partir de una visión a largo plazo. Lo más probable es que la "peligrosa interferencia antropogénica" se manifieste de lleno cuando las concentraciones atmosféricas de carbono caigan entre las 450 y las 550 partes por millón (ppm). Las tendencias mundiales del uso de la energía, de la deforestación y del crecimiento industrial podrían llevarnos a duplicar esa cantidad para finales de siglo. El Informe Stern, un excelente estudio elaborado por el Ministerio de Hacienda británico, deja claro que las consecuencias podrían ser catastróficas: el deshielo de los casquetes polares, con un gran aumento del nivel de los océanos; malas cosechas a gran escala; la transmisión acrecentada de enfermedades; y mermas desastrosas en los servicios que nos prestan los ecosistemas.

Por lo tanto, el mundo tendría que estabilizar las concentraciones de gases de invernadero entre 450 y 550 ppm. (Mi estimado colega Jim Hansen insta a que sea el nivel más bajo, otros, el más alto.) El objetivo para mediados de siglo podría ser reducir 50 ppm con respecto a la tendencia; tendríamos así una meta que cumplir en los próximos 40 años consecuente con la estipulada para finales de siglo. Estos objetivos irían adaptándose a los hallazgos científicos que fueran surgiendo. Una vez fijados los dos umbrales a largo plazo, los gobiernos del mundo podrían adoptar estrategias para alcanzarlos. Entre ellas, establecer incentivos de mercado para reducir las emisiones; investigar los usos sostenibles de la energía, el suelo y el desarrollo industrial; y transferir tecnología de los países ricos a los pobres.

El Informe Stern deja claro que será mucho más barato llevar a cabo este control que no hacer nada. Esfuerzos de bajo coste y alto beneficio parecen prometedores al menos en tres áreas importantes: la mejora del uso eficiente de la energía, las técnicas energéticas que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y el uso sostenible del suelo. Es probable que con técnicas inteligentes los costes anuales de estabilización de los gases de invernadero se mantendrían a largo plazo por debajo del 1 por ciento del PIB mundial. Los países ricos podrían ayudar a los pobres a adoptar las técnicas necesarias.

Por tanto, es hora de proponerse un razonable plan a largo plazo en el que participen todos los países. Salen las cuentas. El congreso de EE.UU. está preparado para respaldar ese camino. La Casa Blanca lo hará también, poco después de 2008 y, con suerte, incluso antes.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Hervé This

¡Cinco al día!

Los expertos afirman que deberíamos consumir por lo menos cinco raciones de hortalizas y frutas al día para prevenir el cáncer y enfermedades cardiovasculares. De acuerdo, pero ¿cómo preparar las hortalizas? Contrariamente a lo que pretenden los seguidores del bucólico Alfonso de Lamartine, apasionados por una naturaleza idílica, no es cierto que los alimentos sean mejores cuando saben a lo que son. Por ello la técnica culinaria se esfuerza en transformar ese gusto. El cocinero higieniza los alimentos, les cambia la textura (ablandándolos o dándoles mayor consistencia) y les da sabor.

Sin la higienización podríamos ser infectados por los parásitos de la carne de cerdo o por la duela del hígado (el trematodo *Fasciola hepatica*), que se encuentra en los berros. El lavado elimina algunos de los microorganismos que contaminan los alimentos. El pelado y el despiece suprimen partes amargas o tóxicas. Así ocurre en el caso de la patata, cuya piel contiene solanina: un alcaloide tóxico que resulta peligroso si se consume en gran cantidad. La cocción mata los microorganismos si se someten a una temperatura adecuada durante un tiempo suficientemente largo.

Este calentamiento puede efectuarse por conducción: se ponen las hortalizas sobre un sólido (el fondo de una cacerola u otro recipiente caliente), se sumergen en un líquido (una disolución acuosa o un aceite) o se colocan en un recinto que contenga un gas caliente (un horno). Dado que las hortalizas se componen principalmente de agua, la conducción del calor en ellas es lenta; la parte en contacto con el sólido caliente corre el riesgo de quemarse antes de que el resto esté suficientemente caliente. De ahí el interés de usar fluidos que penetren en todos los recovecos del alimento: agua hirviendo, aire caliente o aceite caliente. Como ventaja adicional, el calor inactiva las enzimas que podrían infundir colores poco apetecibles. El lavado elimina también diversas sustancias de sabor agrio o astringente, eventualmente tóxicas; asimismo, inactiva moléculas como las lectinas, peligrosos anticoagulantes presentes en las judías, las habas y las lentejas.

La textura de los alimentos se modifica mediante acciones físicas y químicas. La operación más simple consiste en trocear una masa vegetal dura para facilitar su asimilación.

La química cuenta con otras armas. Las células vegetales están recubiertas por una pared resistente formada, en esencia, por celulosas y pectina. Por tanto, lo mejor es atacar esta pared y, sobre todo, disgregar el cemento intercelular. Ello se logra por la acción del calor, pero existen también otras opciones. Por ejemplo, un cocinero del siglo XXI puede recurrir a las pectinasas, enzimas que degradan las pectinas. También puede añadir un compuesto alcalino al agua de cocción (por ejemplo, bicarbonato) para disociar los ácidos carboxílicos (—COOH) de las moléculas de pectina, pasándolos a su forma dotada de carga eléctrica ($—COO^-$). Esta carga provoca repulsiones que favorecen el reblandecimiento de las verduras. El cocinero puede recurrir a agentes complejantes del calcio. Dicho ion divalente tiende puentes entre las moléculas de pectina; cuando se secuestra el ion mediante el complejante, se evita esta unión y, por tanto, la verdura se reblandece.

El cocinero puede provocar una ósmosis para ablandar la hortaliza. Un pepino deja de ser crujiente cuando se recubre de sal. Del mismo modo se modifica su turgencia cuando se sumerge en salsa de soja, en azúcar, en alcohol o en un ácido (zumo de limón o de cualquier otra fruta, vinagre, cerveza, vino, etcétera).

Por último, se plantea el problema esencial: el sabor. Contrariamente a una idea demasiado extendida, la cocción al vapor no conserva el sabor de los alimentos. Es imposible encontrar el sabor de las hortalizas crudas a menos que se roan directamente. Al cortarlas se rompen las células, con lo que se liberan enzimas vegetales que atacan los sustratos. Lo mejor que puede hacer el cocinero es cocer las hortalizas en una emulsión, mezcla de alguna materia grasa y agua: las moléculas olorosas o sápidas solubles en agua se disolverán en ella mientras que las moléculas olorosas o sápidas insolubles en agua se repartirán por la materia grasa.

Si los cocineros explotaran los recursos que la química les ofrece, podrían mejorar sus resultados. En una caramelización, por ejemplo, se ponen en juego los azúcares que los vegetales contienen en cantidad notable. Basta con calentar un jugo de verduras para eliminar el agua y luego llevar las hortalizas a una temperatura suficiente para que pueda tener lugar la caramelización de la sacarosa y de los azúcares que contienen (glucosa, fructosa o inulina en las cebollas, la achicoria, los espárragos, etcétera). El cocinero puede también sacar partido de las reacciones de Maillard, que se dan en presencia de aminoácidos. Para ello, antes de cocer las hortalizas deben sumergirse en una solución concentrada de gelatina, en clara de huevo, en caldo de carne o de pescado; después se calientan como para un lacado.

Las posibilidades de obtener sabores nuevos son ilimitadas. Pruebe a licuar zanahorias y calentar el jugo a fuego lento durante largo tiempo. Obtendrá un resultado sorprendente y delicioso.



La formación de cristales de nieve

Sutiles procesos moleculares gobiernan el crecimiento de una amplia variedad de estructuras del hielo muy elaboradas

Kenneth G. Libbrecht

Lo mismo una bandeja de cubitos en el congelador que la superficie de un lago en crudo invierno, el hielo adquiere la forma de su recipiente. Pero cuando se trata de copos de nieve, la mera congelación del agua produce resultados completamente distintos: una impresionante diversidad de formas complejas que siguen ciertos patrones. No hay dos copos de nieve iguales. Basta contemplar un día de nevada para evocar las sensaciones que movieron a Henry David Thoreau a exclamar: "¡Cuán lleno del genio creativo está el aire donde se generan! No me admiraría más si cayesen estrellas del cielo para posarse sobre mi abrigo".

El agua es una sustancia común, tanto que cabría suponer que ya lo sabemos todo del "genio creativo" de Thoreau, es decir, del modo en que los copos de nieve desarrollan sus estructuras complejas. La verdad es que nos hallamos lejos de explicar, siquiera en términos cualitativos, la formación de esas diminutas esculturas de hielo.

El crecimiento de los copos de nieve constituye un fenómeno altamente no lineal y fuera del equilibrio, en el que intervienen sutiles procesos de nanoescala que condicionan el desarrollo de patrones complejos en todas las escalas. La comprensión de este fenómeno requiere una síntesis de la dinámica molecular, la física de superficies, el crecimiento de inestabilidades, la formación de patrones y la mecánica estadística. Aunque caen en cantidades ingentes de las nubes invernales, los cristales de nieve esconden todavía numerosos misterios.

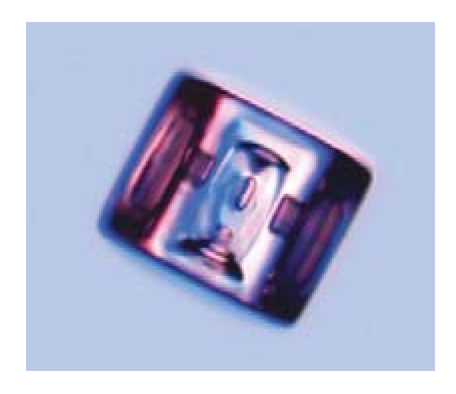
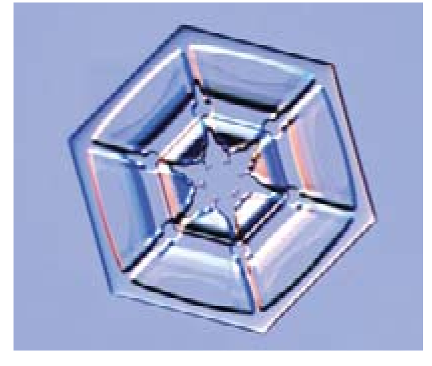
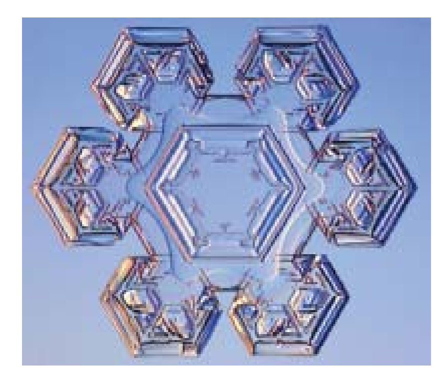
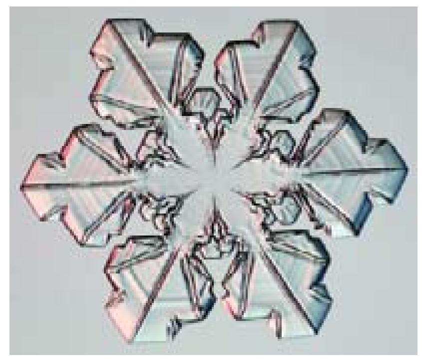
Una colección de cristales

Los "cristales de nieve" corresponden a las estructuras que se forman cuando el vapor de agua de la atmósfera se condensa directamente en hielo, sin pasar por la fase líquida. La expresión "copo de nieve", perteneciente al lenguaje meteorológico, designa tipos de precipitaciones invernales diversos, desde cristales de nieve sueltos hasta aglomerados de cristales que colisionan y se traban cayendo en forma de blandas bolitas.

La formación de cristales de nieve suele comenzar cuando el viento hace que una masa de aire caliente y húmedo choque con otra masa de aire distinta, con la generación consiguiente de un frente climático en la zona de contacto. La colisión provoca que la masa de aire caliente ascienda y se enfríe. Una vez que el aire esté lo suficientemente frío, una parte del vapor de agua que contiene se condensa en innumerables gotitas de agua. Cada gotita necesita un núcleo sobre el que condensarse; de ello se encargan las partículas de polvo del aire. Dada la eficacia de las esferas micrométrica para dispersar la luz, cuando se juntan en cuantía notable se crea una nube. Un banco de nubes de buen tamaño puede contener un millón de toneladas de agua en forma de gotitas en suspensión.

Si la nube recién constituida continúa enfriándose, el polvo desempeñará otra función en la formación de nieve. Cuando la temperatura desciende por debajo de cero grados Celsius, las gotículas acuosas no se congelan de inmediato, sino que permanecen líquidas en un estado subenfriado (se subenfrían hasta casi –40 grados antes de congelarse). El polvo proporciona una superficie sólida para comenzar la congelación, con lo que las gotitas de agua, repletas de polvo, comienzan a congelarse alrededor de –6 grados. Cada partícula de polvo es distinta; por tanto, cada gotita se congelará a una temperatura diferente. Se produce así una transición gradual entre el enfriamiento de la nube y la congelación de las gotículas.

Una vez que una gota se congela, comienza a crecer y a desarrollarse a la par que se va condensando en superficie el vapor de agua circundante. Por tanto, los cristales de nieve se forman, sobre todo, a partir de vapor de agua —no de agua líquida— que se solidifica directamente en una estructura cristalina. Las gotículas líquidas de la nube que permanecen sin congelar se evaporan poco a poco; de este modo, suministran al






1. LOS CRISTALES DE NIEVE adoptan multitud de formas y tamaños (*por filas, de izquierda a derecha*): columnas con las caras ahuecadas debido a la pugna por el vapor de agua, láminas hexagonales, láminas estrelladas, láminas divididas en sectores, dendritas estrelladas, columnas huecas, agregaciones de agujas, columnas con casquetes y rosetas de balas con casquetes. Los prismas sencillos de menor tamaño pueden medir décimas de milímetro; las dendritas estrelladas mayores miden 10 milímetros de diámetro. Todos estos cristales de nieve fueron recogidos de nevadas naturales. La investigación en el laboratorio nos revela el modo en que la simple congelación del vapor de agua genera semejante variedad de formas.

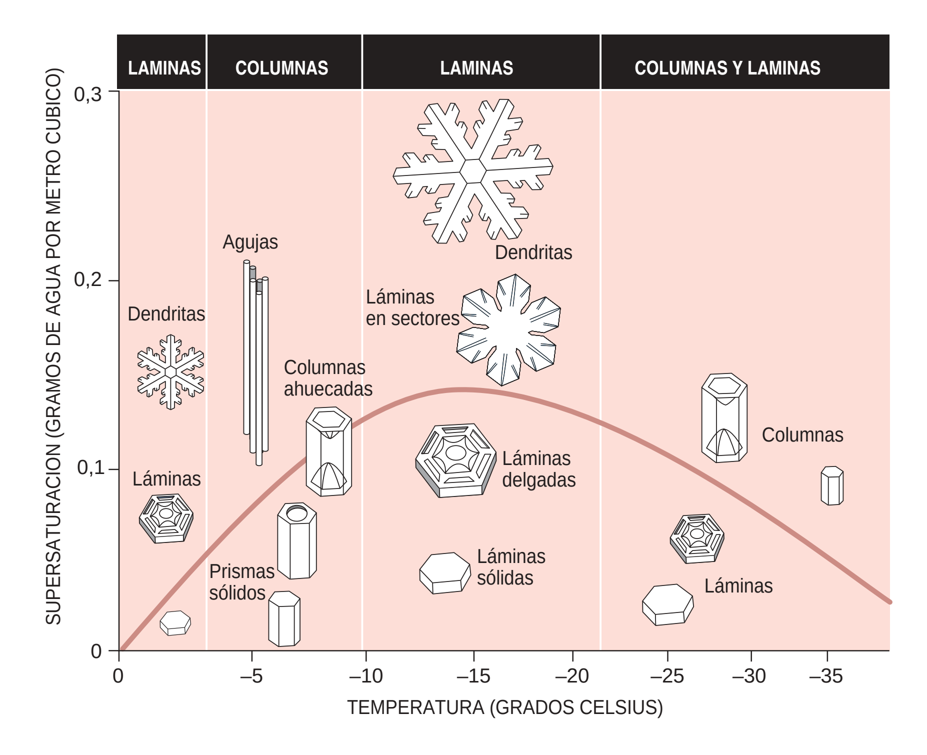
KENNETH G. LIBBRECHT Y WWW.SNOWCRYSTALS.COM/*American Scientist*

aire el vapor de agua que nutre a sus "hermanas congeladas".

Existe, pues, una transferencia neta de moléculas de agua desde las gotitas líquidas al vapor de agua y, por fin, a los cristales de nieve. Este es el método indirecto de congelación del agua líquida de una nube. Deben evaporarse alrededor de un millón de gotitas para suministrar el vapor de agua que requiere la formación de un cristal de nieve. Al ir creciendo, los cristales ganan peso hasta que la gravedad termina por sacarlos de las nubes.

El ángulo entre los átomos de una molécula de agua impone que la red cristalina del hielo sea hexagonal, lo que resulta en una simetría de orden seis para los copos de nieve. Los cristales de nieve empiezan siendo pequeños prismas, pero llegan a crecer hasta unas décimas de milímetro (más o menos el tamaño del punto al final de esta frase). En función de los pormenores de su crecimiento, se convierten en finas columnas hexagonales con forma de lapicero, láminas hexagonales delgadas o cualquier estructura intermedia.

Cuanto mayores se hacen los cristales, mayor elaboración se advierte en las estructuras desarrolladas. Los cristales de nieve de forma columnar pueden convertirse en columnas huecas con agujeros cónicos en sus extremos o pueden crecer en forma de finas agujas de milímetros de longitud. Las columnas robustas acostumbran agruparse en "rosetas de balas", denominación que deben a la figura adquirida por las columnas individuales. Cerca del centro de ese cúmulo se produce una pugna por el vapor de agua que impide el crecimiento cristalino; de ahí que las columnas presenten una base puntiaguda.





2. LA ESTRUCTURA DE LOS CRISTALES DE NIEVE es sensible a la temperatura y a la humedad. Así lo muestra el diagrama morfológico (*arriba*) que Ukichiro Nakaya elaboró en los años treinta del siglo pasado. Aquí, la sobresaturación se refiere a un exceso de vapor de agua en el aire cuando la humedad está por encima del 100 por ciento. El diagrama muestra que, entre 0 y –3 grados, aparecen pequeñas láminas y estrellas. Entre –3 y –10 grados, los cristales forman agujas finas y columnas largas. Entre –10 y unos –22 grados, se generan láminas para sobresaturaciones bajas y grandes estructuras ramificadas para niveles superiores de vapor de agua; alrededor de –15 grados se observan formas grandes y fotogénicas. A temperaturas inferiores se crean pequeñas láminas o columnas, de nuevo, dependiendo de la humedad. La curva muestra la sobresaturación que se encontraría dentro de una nube densa. También se han desarrollado tablas de clasificación de cristales de nieve que contienen hasta 80 tipos. Una selección de esa tabla (*abajo*) expande alguno de los grupos del diagrama morfológico.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

Pequeñas láminas pueden hacer brotar seis ramas primarias; se forman entonces cristales de nieve estrellados. Los especímenes de buen tamaño presentan un diámetro de entre 2 y 3 milímetros (más o menos el tamaño de esta “O” mayúscula). Los brazos de las láminas estrelladas ramificadas suelen presentarse decorados con crestas y otros patrones ornamentales. Las seis ramas principales de un cristal de nieve estrellado pueden también dar lugar a numerosas ramas laterales adicionales: se obtienen así estructuras dendríticas filiciformes que miden hasta 10 milímetros de diámetro. Las ramas laterales, separadas por ángulos múltiplos de 60 grados, avanzan en paralelo a las hileras de ramas vecinas.

A veces ocurre que un cristal de nieve comienza a crecer en forma de columna, para cambiar luego a un crecimiento laminar; el resultado son dos cristales laminares unidos por una columna, a semejanza de dos ruedas encajadas en un eje. Estas formas un tanto exóticas se denominan “columnas con casquetes”. Adviértase que los ejemplos de simetría perfecta constituyen la excepción, no la regla, en los copos de nieve. Existen numerosos mecanismos que interrumpen el crecimiento perfecto de los cristales de nieve.

Cuando una gotita de una nube se congela inicialmente en un cristal de nieve naciente, mide un par escaso de micrómetros. Si se congela en un monocristal de hielo sin defectos, su forma inicial resulta completamente irrelevante en la determinación de la figura final. La elaborada morfología de un cristal de nieve individual surge con el tiempo, a medida que se va condensando en la superficie cristalina el vapor de agua y desarrollándose la estructura. Un cristal de nieve no se forma esculpiendo un bloque de hielo, sino mediante la adición selectiva de material. Para entender el abanico de formas y patrones que presentan los cristales de nieve debemos ahondar en la dinámica del crecimiento cristalino.

El diagrama morfológico

La simetría y la complejidad de los cristales de nieve viene debatiéndose desde hace siglos. Johannes Kepler, quien se percató de que los planetas orbitaban alrededor del Sol siguien-

do trayectorias elípticas, aplicó el método científico al estudio de los cristales de hielo. En 1611, Kepler escribió *El copo de nieve de seis puntas*, un tratadito sobre las formas floreadas de los cristales de nieve. De la comparación de las flores con los copos de nieve, Kepler dedujo:

"Cada planta posee un principio de animación, pues cada individuo existe independiente y no hay razón para sorprenderse de que cada una porte una forma propia. Pero imaginar que cada estrellita de nieve posee un alma individual resulta absurdo; las formas de los copos de nieve no se deducen, en absoluto, de la operación del alma, que sería el caso de las plantas."

Si reemplazamos "alma" por "la bioquímica de los organismos vivos", Kepler estaba básicamente en lo cierto. No hay anteproyecto genético alguno que guíe el desarrollo de un cristal de nieve. Su crecimiento viene determinado por reglas físicas simples, mucho más simples que la química de los organismos; pese a tal sencillez, hacen emerger de manera espontánea patrones complejos. Kepler se dio cuenta de que la génesis de esas estructuras complejas a partir de precursores simples constituía una cuestión del mayor interés científico. En la investigación del fenómeno nos hallamos todavía.

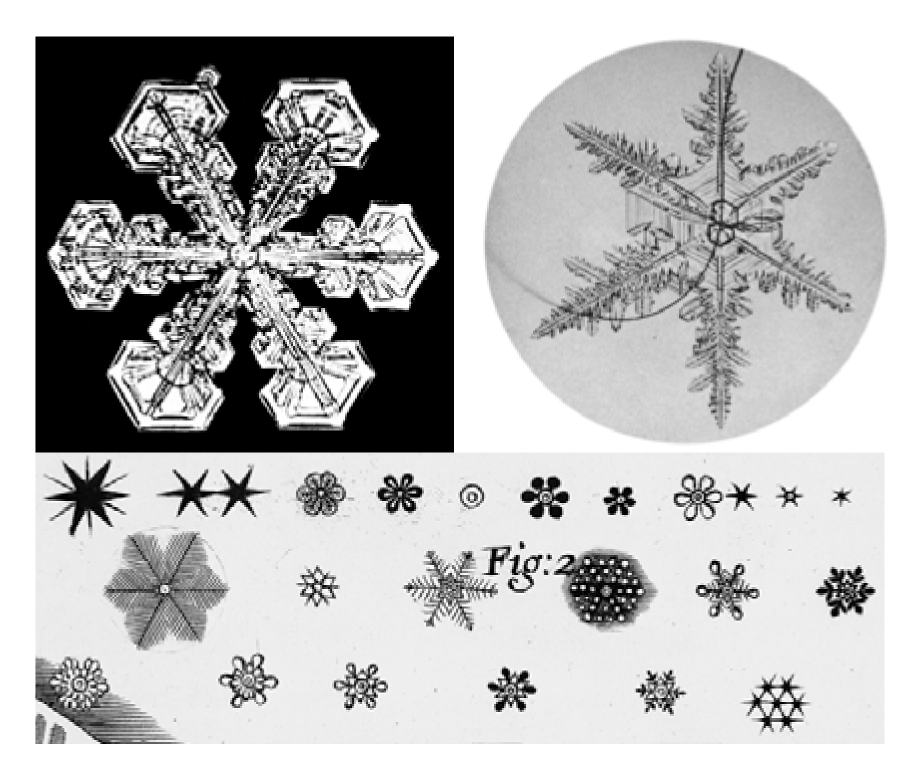
El advenimiento de las técnicas de difracción de rayos X, en los años veinte del siglo pasado, arrojó luz sobre las estructuras cristalinas y estableció las bases de la cristalografía. No tardó en manifestarse la simetría hexagonal de la red cristalina del hielo. La estructura reticular permitió explicar la simetría hexagonal, aunque por sí sola no aclaraba la complejidad morfológica de los cristales.

Ukichiro Nakaya, de la Universidad de Hokkaido, aplicó las técnicas del siglo XX a esta cuestión en una destacable serie de trabajos experimentales realizada en los años treinta. Tras observar y documentar los distintos tipos de cristales de nieve naturales, Nakaya reparó en la necesidad de acometer experimentos en el laboratorio para investigar bajo qué condiciones aparecía cada tipo de cristal.

Nakaya desarrolló diversas técnicas para promover el crecimiento de cristales de nieve, uno por uno. Descubrió que la morfología de un cristal dependía de la temperatura y de la humedad del aire. Por debajo mismo de la congelación, a unos –2 grados, aparecían cristales laminares, muy finos. En condiciones más frías, alrededor de –5 grados, emergían unas esbeltas agujas. A –15 grados se formaban los cristales laminares más largos y finos; por debajo de los –25 grados, los cristales crecían en columnas enanas.

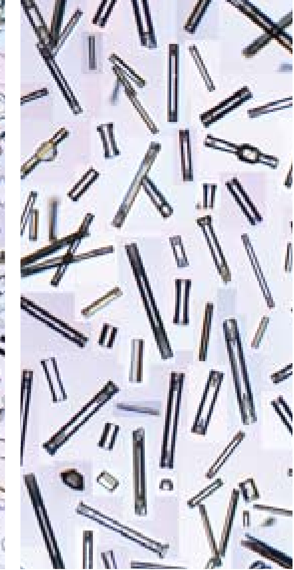
Para todas las temperaturas, Nakaya observó que surgían cristales prismáticos sencillos cuando la humedad era baja y lento el crecimiento; una humedad mayor, en cambio, daba lugar a un crecimiento más rápido y estructuras de mayor complejidad. Asimismo, trabajos posteriores han demostrado que los cristales de tamaño reducido suelen presentar formas más simples, mientras que los más grandes entrañan mayor complejidad estructural.

Nakaya sintetizó los resultados de todas sus investigaciones en el "diagrama morfológico de los cristales de nieve", donde se representa la forma del cristal en función de la temperatura y la humedad. Setenta y cinco años después, seguimos sin conocer la razón de buena parte de las características que muestra el diagrama. En particular, la extraña dependencia de la morfología del cristal con la temperatura, que exhibe un comportamiento oscilante entre láminas y columnas en un intervalo de escasos grados, constituye un rompecabezas inexplicable.



3. LA BELLEZA DE LOS CRISTALES DE NIEVE se aprecia incluso a través de una lupa. Si buscamos imágenes detalladas, necesitamos un microscopio. En 1665, Robert Hooke usó su microscopio rudimentario (ofrecía un aumento poco mayor que una lupa) para esbozar la forma de los copos de nieve (*abajo*). Wilson A. Bentley, granjero de Vermont, reunió una impresionante colección de más de 5000 imágenes desde finales del siglo XIX hasta el decenio de los años veinte del siguiente. Aplicó una cámara al microscopio; siguió un meticuloso proceso de recorte a mano de los negativos para mejorar el contraste de fondo (*arriba a la izquierda*). Las publicaciones de Bentley ratificaban que no había dos copos de nieve iguales. En los años treinta, Nakaya desarrolló técnicas de imagen más avanzadas. E introdujo el desarrollo de copos de nieve en el laboratorio (*arriba a la derecha*). Anclaba el cristal mediante un pelo de conejo, puesto que las grasas del pelo promovían el crecimiento a partir de un único sitio de nucleación, en vez de una congelación uniforme a lo largo del filamento.

CORTESIA DE LA ADMINISTRACION NACIONAL OCEANICA Y ATMOSFERICA ESTADOUNIDENSE NOAA (*arriba a la izquierda*); CORTESIA DE HARVARD UNIVERSITY PRESS (*derecha*)/*American Scientist*


4. LA DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA de las formas de los cristales de nieve que muestra el diagrama morfológico cobra vida con nieve artificial. Todos estos cristales se formaron en el laboratorio al caer libremente en una atmósfera con un nivel intermedio de sobresaturación, a temperaturas variables. El panel de la izquierda muestra un montaje de cristales formados a –2 grados Celsius, el del medio a –5 grados y el de la derecha a –15 grados.

El diagrama morfológico sí da cuenta, en cambio, de dos de los rasgos principales de los cristales de nieve: por qué difieren tanto unos de otros y por qué las seis ramas de un cristal estrellado guardan estrecho parecido. La respuesta surge de una observación de Nakaya: el crecimiento muestra una sensibilidad exquisita ante la temperatura y la humedad.

Mientras se mueve por el interior de una nube, un cristal en desarrollo experimenta cambios continuos de temperatura y humedad. Cada variación en su entorno local altera la forma en que el cristal crece. El crecimiento puede ser planar o columnar, facetado o ramificado, según las condiciones. Tan extrema sensibilidad ante la temperatura y la humedad determina que con variaciones nimias en el interior de la nube se originen cambios sustantivos en el tipo de crecimiento. Tras un recorrido interrumpido por numerosos giros y tropiezos, el cristal presenta una estructura final compleja.

Además, la ruta que toma cada copo de nieve constituye en sí misma un camino aleatorio, influido por los bucles y remolinos caóticos de la atmósfera. Es imposible que dos copos de nieve sigan exactamente el mismo camino a través de las nubes; por ese motivo, resulta improbable que demos con dos copos de nieve idénticos. La naturaleza, diríase, se divierte creando una variedad impresionante de formas cristalinas.

A pesar de que cada copo de nieve sigue un camino distinto, los seis brazos de un cristal estrellado viajan juntos. Sufren los mismos cambios ambientales al mismo tiempo. Por tanto, las ramas se desarrollan en sincronía porque comparten idéntico historial de crecimiento. El "genio creativo" de Thoreau, capaz de diseñar cristales de nieve en una innumerable cantidad de preciosos y simétricos patrones, se esconde en los vientos siempre cambiantes.



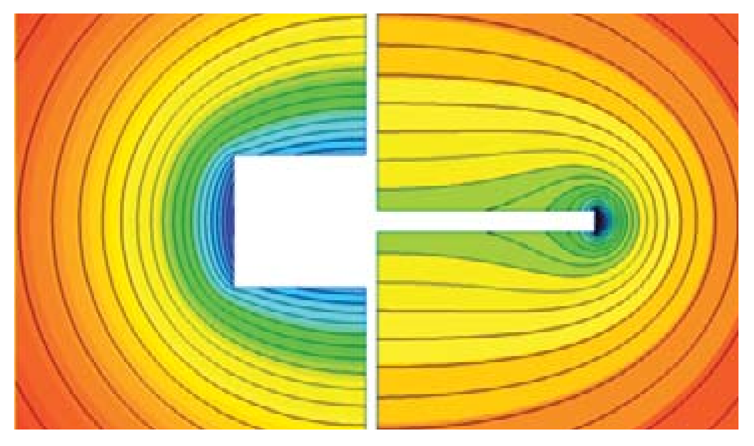

5. LOS CRISTALES DE NIEVE obtenidos en el laboratorio ofrecen la oportunidad de explorar los pormenores de la combinación de mecanismos de crecimiento y las distintas condiciones bajo las cuales operan. Dado que las cámaras de experimentación no proporcionan el mismo tiempo de caída libre que la atmósfera real, conviene hacer crecer los cristales en algún soporte. De acuerdo con cierta técnica, se desarrollan cristales de nieve en las puntas de finas agujas de hielo que brotan de un cable electrificado (*izquierda*). El campo eléctrico intenso atrae a las moléculas de agua del aire, lo que acelera el crecimiento de la aguja. Cuando eliminamos la carga eléctrica, el crecimiento del cristal vuelve a la normalidad. Mediante el control de la temperatura y la humedad se obtienen copos de nieve de diseño. Por ejemplo, en las puntas de una dendrita se hacen crecer columnas huecas y luego tapas laminares sobre cada columna; se obtiene así una suerte de candelabro (*derecha*). La secuencia de cambios de temperatura que produce dichas formas sería poco probable dentro de un banco de nubes natural.

KENNETH G. LIBBRECHT/*American Scientist*

Ramificaciones

Más allá del diagrama morfológico, el avance en el conocimiento de los cristales de nieve se lo debemos a cristalógrafos y metalúrgicos. Unos y otros han venido cimentando en los últimos decenios la ciencia de materiales. La industria de los semiconductores impulsó la investigación cuando la obtención de cristales de gran tamaño —que requería la comprensión de la dinámica del crecimiento cristalino— se convirtió en una necesidad comercial.

La formación de facetas (superficies cristalinas planas) constituye un fenómeno ubicuo en el crecimien-





6. MODELOS COMPUTACIONALES de la concentración de vapor de agua alrededor de los bordes de láminas de cristales de nieve gruesas (*izquierda*) y finas (*centro*) demuestran que hay menos vapor de agua disponible en torno a los bordes de láminas finas en crecimiento rápido. Las bandas coloreadas indican la concentración de vapor de agua, que aumenta del azul al rojo. Dichos modelos sugieren un nuevo mecanismo de crecimiento, la "inestabilidad del filo de la navaja", que amplifica pequeños cambios intrínsecos en el crecimiento cristalino. Esta inestabilidad acelera el crecimiento de láminas finas y explica la formación de columnas con casquetes, donde el cristal parece cambiar espontáneamente de un desarrollo columnar a otro laminar (*derecha*).

KENNETH G. LIBBRECHT/*American Scientist*

to cristalino. El facetado desarrolla una función primordial a la hora de guiar el crecimiento de los cristales de nieve. Una vez que se congela una gotita de la nube, el cristal en expansión desarrolla facetas, pues unas superficies cristalinas van acumulando material con mayor celeridad que otras. Las moléculas en condensación son atraídas hacia superficies redondeadas (rugosas a escala atómica), puesto que dichas zonas ofrecen mayor disponibilidad para establecer enlaces químicos. Las regiones planas (facetas superficiales) cuentan con menor densidad de enlaces químicos "colgantes"; constituyen, por tanto, sitios menos favorables para un enlace.

Tras un breve intervalo de desarrollo cristalino, se conservan sólo las superficies de las caras que crecen más despacio. El cristal adquiere, por fin, una estructura facetada, con independencia de su aspecto inicial. El enlace molecular en la red cristalina determina que las superficies experimentan un crecimiento lento y, por tanto, qué planos darán lugar a facetas. A través del facetado, la geometría de la molécula de agua se transfiere a la geometría del cristal.

Distintos cristales minerales presentan estructuras facetadas diferentes, en función de su entramado molecular peculiar. Cuando el facetado domina el crecimiento, se obtiene un cristal hexagonal con seis caras laterales, o facetas prismáticas, y dos superficies (superior e inferior), o facetas basales. Se trata del patrón típico de los cristales de nieve de tamaño reducido o de crecimiento lento. Solemos percibir restos de esa tipología en el centro de cristales de mayor tamaño y complejidad, lo que revela una forma inicial sencilla.

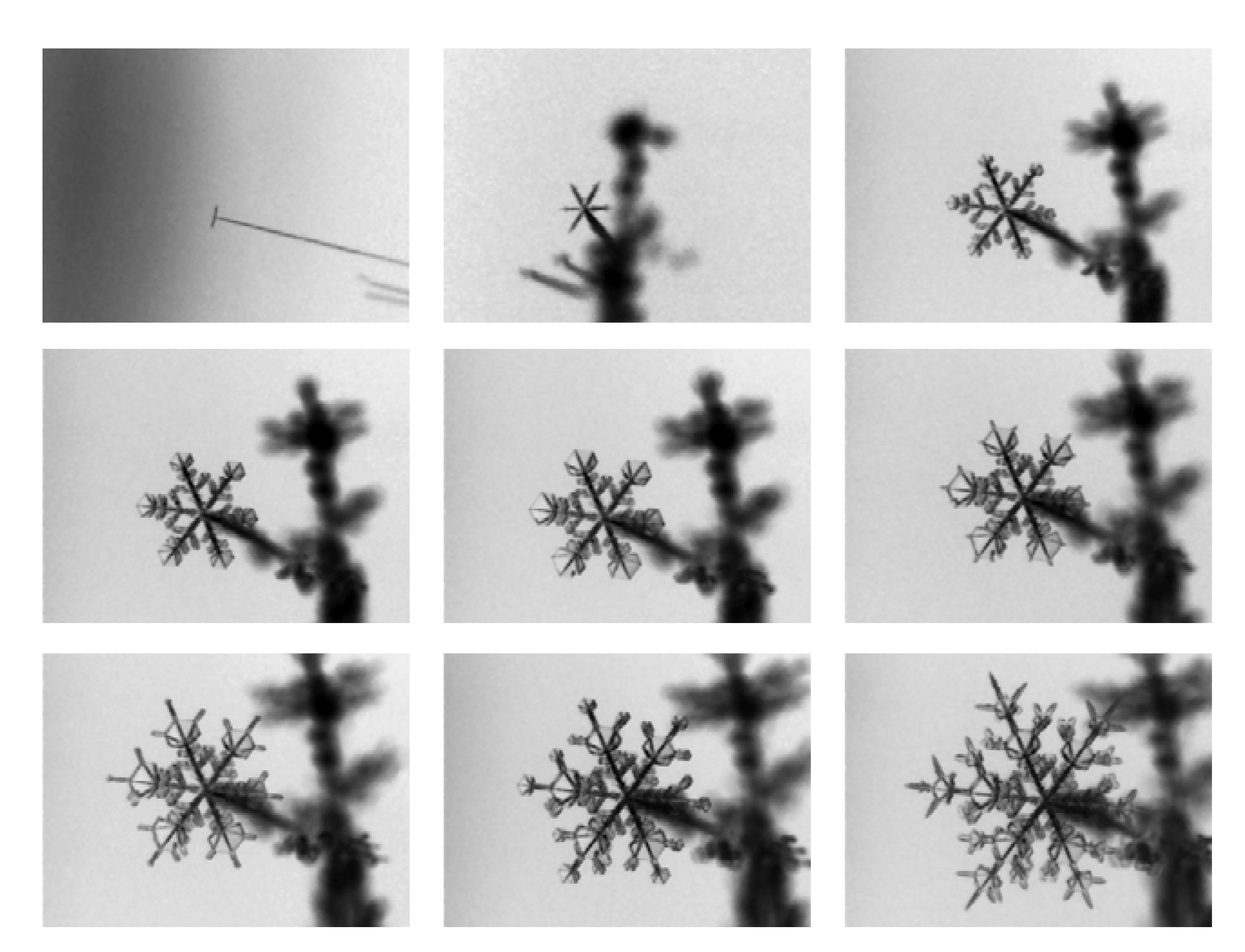
Bajo ciertas condiciones, las moléculas de agua se adhieren a las superficies prismáticas con facilidad mayor que a las basales. Así se generan finas láminas de hielo. En otras circunstancias, las moléculas se adhieren a las facetas basales, promoviendo la aparición de columnas. En cualquier caso, el facetado constituye uno de los mecanismos principales de producción de formas y patrones.

Sin embargo, el facetado no lo explica todo; si así fuera, los cristales de nieve constituirían simples prismas hexagonales, algo muy lejano de la verdad. Otros procesos adicionales intervienen en la formación de cristales de gran tamaño (medio milímetro de un extremo al otro) o de crecimiento rápido. En ese caso, el cristal puede hacer brotar ramas, en virtud de la inestabilidad de Mullins-Sekerka (o inestabilidad de ramificación). El proceso en cuestión explica la aparición espontánea de complejas estructuras floriformes en los cristales de nieve a partir sólo de la congelación de vapor de agua.

En su crecimiento, los cristales de nieve van usando el vapor de agua presente en su entorno cercano; se necesita cierto tiempo para que otras moléculas se difundan a través del aire hasta llegar al cristal. Por tanto, el crecimiento de un cristal de nieve se encuentra limitado por la difusión.

Las diversas regiones del cristal pugnan por los recursos disponibles. Si una zona del cristal sobresale (pensemos en una de las puntas de una lámina hexagonal), las moléculas de agua se acumularán preferentemente allí, porque la distancia de difusión es menor. Con un aporte de material ligeramente mayor, ese vértice crecerá con celeridad mayor, lo que dará lugar a una punta más pronunciada. Se establece entonces una retroalimentación positiva que refuerza el efecto, y desde las seis puntas de un cristal de nieve hexagonal brotan ramas largas. Con el tiempo, numerosas ramas laterales emergen de protuberancias aleatorias o de puntas facetadas de los brazos principales.

Inestabilidades de este tipo constituyen la clave de la creación de patrones. La naturaleza se asemeja a una cadena de sistemas inestables, superpuestos. El Sol calienta el aire cerca del suelo. El aire caliente se eleva; esta inestabilidad convectiva da lugar al viento, las nubes y al resto de los meteoros. El viento resultante sopla sobre la superficie del océano, tornándola inestable, con la generación consiguiente de olas, y transporta humedad a la atmósfera.



7. OBTENCION DE UN CRISTAL DE NIEVE en el laboratorio. Esta serie de imágenes muestra el modo en que las estructuras de hielo alcanzan sus elaboradas formas. Inicialmente, la temperatura y la humedad se ajustaron para fomentar la ramificación. Después, las condiciones se cambiaron a otras que favorecían el facetado y el crecimiento laminar. Mediante la alternancia de estos dos ambientes se remedaron los tumbos que da un copo de nieve al sufrir las variaciones climáticas locales que se producen en el interior de una nube. El cristal resultante muestra períodos alternantes de ramificación y crecimiento laminar.

KENNETH G. LIBBRECHT/*American Scientist*

Al llegar estas olas a las playas someras, pierden estabilidad y rompen.

El facetado y la ramificación constituyen dos fuerzas dominantes en el crecimiento de cristales de nieve. Operan en direcciones opuestas. El facetado corresponde a un proceso estabilizador que lleva a la creación de superficies planas y formas simples (sólo con el facetado, todos los cristales de nieve serían prismas hexagonales). La ramificación, en cambio, constituye un proceso inestable que convierte formas simples en complejas (la ramificación sola produciría cristales con riqueza estructural, sin simetría, como matorrales de hielo en miniatura). La acción constante y recíproca entre estas dos fuerzas esculpe las formas y los patrones de los cristales de nieve.

Inestabilidades

A pesar de que la ramificación y el facetado explican en buena medida el crecimiento de los cristales de nieve, no bastan para comprender la organización global del diagrama morfológico. A lo largo de decenios, se sostuvo que la tasa de crecimiento de las superficies prismáticas y basales dependía sólo de la temperatura. Si las superficies prismáticas acumulaban material con mayor prontitud que las superficies basales, el resultado eran láminas. Si ocurría lo contrario, se generaban columnas y agujas. Para que hubiese concordancia con el diagrama morfológico, los índices de crecimiento relativos deberían, sin embargo, cambiar drásticamente con la temperatura, al menos en dos órdenes de magnitud y en pocos grados.

He dedicado los últimos años al estudio de la formación de cristales de nieve, apoyado en mediciones precisas de las tasas de crecimiento bajo condiciones controladas. En esencia, se trata del mismo enfoque de Nakaya, con la salvedad de que ahora disponemos de técnicas del siglo XXI: interferometría láser, registro de datos digitales, control exquisito de la temperatura y otros avances que el japonés nunca hubiera imaginado.

Esperaba hallar una fuerte variación del crecimiento cristalino con la temperatura, en coherencia con el diagrama morfológico. Si las láminas finas y las columnas esbeltas crecían con una diferencia de sólo un par de grados, resultaba lógico inferir que las tasas de crecimiento de las facetas basales y de las prismáticas

divergirían unas de otras y cambiarán rápidamente con la temperatura.

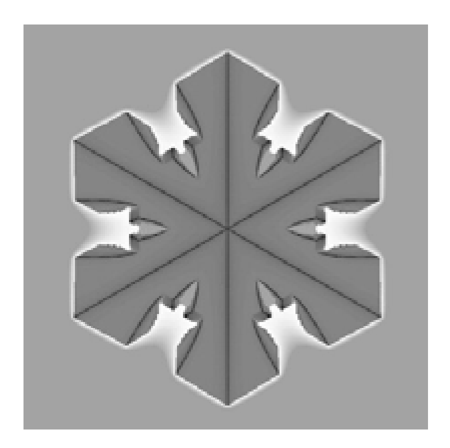
Pero los datos nos trajeron otra realidad. Había algunas diferencias entre facetas, pero no alcanzaban la magnitud esperada. Asimismo, las tasas de crecimiento cambiaban ligeramente con la temperatura, aunque no en cuantía suficiente para justificar los rasgos observados en el diagrama morfológico.

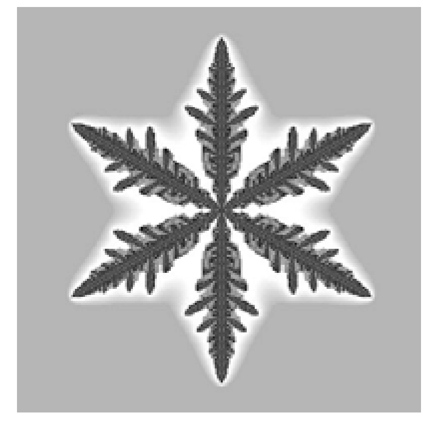
La situación se tornó más intrigante todavía cuando empecé a desarrollar modelos computacionales del crecimiento cristalino limitado por difusión, en concreto del crecimiento de láminas finas. Los principios de la inestabilidad de ramificación sugerían que la humedad debería ser máxima en la arista de una lámina, puesto que sobresale más en el aire que rodea el cristal. Las simulaciones indicaban, en cambio, que el rápido crecimiento de los bordes de la lámina tendía a vaciar el vapor de agua en esa zona, con lo que la humedad cerca del borde es menor que en otras regiones. Semejante resultado contra toda intuición daba a entender que la inestabilidad de ramificación no fomentaba el crecimiento de láminas finas, sino que conducía al crecimiento de bloques.

El diagrama morfológico seguía sin comprenderse. Según el modelo teórico, las tasas de crecimiento deberían cambiar en un factor de 100 o incluso 1000 en pocos grados de temperatura. Pero ello parecía contradecir las leyes de la dinámica del crecimiento cristalino. Y, en efecto, las mediciones mostraron que no había cambios tan rápidos. Se requería un elemento nuevo para dar cuenta de los cambios drásticos en la forma de los cristales con la temperatura.

Estoy convencido que la solución reside en la *cinética de adherencia dependiente de la estructura*. Parto de una hipótesis fundamental: la tasa de crecimiento intrínseca de una superficie facetada depende de su estructura. Una faceta superficial extremadamente estrecha, como la que existe justo en el borde de un cristal laminar fino, crecerá con mayor celeridad que otra faceta más ancha. Desconocemos la dinámica molecular subyacente.

Pudiera acontecer que las moléculas que se hallan en el borde de





CORTESIA DE DAVID GRIFFEATH Y JANKO GRAVNER, UNIVERSIDAD DE WISCONSIN, MADISON/*American Scientist*

8. MEDIANTE EL AUTOMATA CELULAR, un método de modelización computacional, matemáticos de la Universidad de Wisconsin en Madison y de la Universidad de California en San Diego han llevado a cabo simulaciones del crecimiento de los cristales de nieve. Estos copos "teóricos" suelen atenerse a las reglas de crecimiento de los cristales de nieve reales.

la lámina fina estén menos trabadas que las moléculas de una superficie más ancha, ya que cuentan con menor número de moléculas vecinas en que enlazarse. Ello causaría que el borde fuera más rugoso que la superficie, puesto que las moléculas de superficie tienen más libertad para presionar en torno. Una zona rugosa es más apta para la agregación molecular, con el potencial incremento de la tasa de desarrollo. No acabamos de entender la complejidad estructural de las superficies de hielo, lo que frustra cualquier intento de demostración o refutación de la hipótesis. Con todo, mantengo la necesidad de la existencia de ese u otro fenómeno similar para explicar los datos.

La cinética de adherencia dependiente de la estructura lleva a un nuevo patrón de crecimiento: *la inestabilidad del filo de la navaja*. Si la arista de un cristal laminar deviene un poco más fino, la cinética de adherencia dependiente de la estructura dicta que aumentará la tasa de crecimiento. Esta aceleración del crecimiento en el borde hará que éste se afile, lo que aumentará la tasa de crecimiento todavía más. Aquí se da de nuevo una retroalimentación positiva que potencia el crecimiento cristalino y promueve la formación de estructuras laminares finas. La inestabilidad continúa hasta que otros mecanismos detienen el afilamiento del borde.

La inestabilidad del filo de la navaja no sólo logra la concordancia entre los datos de crecimiento cristalino, sino que explica también numerosos aspectos de los cristales de nieve naturales. Así, las primeras mediciones de Nakaya mostraron que los cristales estrellados de gran tamaño presentaban un grosor característico de alrededor de 0,01 milímetros (una décima parte del grosor de una hoja de papel), valor independiente del tamaño del cristal y de la complejidad de la ramificación. Tal comportamiento es el que cabría esperar de este tipo de inestabilidad. Y no parece fácil encontrar otra explicación.

Además, los cristales columnares con casquetes suelen mostrar una transición brusca entre la columna central y las dos láminas de los extremos. Este cambio de crecimiento, en apariencia instantáneo, produce a menudo cristales con láminas finas en los extremos de una columna central. Uno esperaría que la norma fuese una transición más gradual, que tendiese a producir láminas más gruesas sobre las columnas. Pero no es eso lo observado.

La inestabilidad del filo de la navaja explica también las columnas con casquete, puesto que las inestabilidades tienden a extender los cambios pequeños en las condiciones iniciales. Si el entorno local cambia en detrimento del columnar, la inestabilidad irrumpe para producir láminas finas. La inestabilidad amplifica el efecto de los cambios lentos en las condiciones externas, instando un

cambio brusco en el crecimiento, que pasa de columnar a laminar.

Esta amplificación constituye un efecto importante de la inestabilidad del filo de la navaja, puesto que reduce de un modo sustancial los cambios de crecimiento dependientes de la temperatura que se necesitan para explicar el diagrama morfológico. Desconocemos la naturaleza de los cambios operados, pero al menos ahora no tienen que ser tan drásticos. Pequeñas variaciones termodependientes en el crecimiento se amplifican para producir las morfologías que se observan en los cristales.

La existencia de la inestabilidad del filo de la navaja sugiere que la dinámica del crecimiento de nanocristales difiere de la dinámica de las estructuras de mayor tamaño. Este fenómeno puede resultar clave para la comprensión del comportamiento de nanodispositivos en el campo de los semiconductores o cualquier clase de fabricación nanométrica donde se exige autoensamblar estructuras complejas a partir de materiales en bruto. Se ignora el alcance de la ubicuidad de la inestabilidad, por no hablar de otras sorpresas que nos pudiera deparar la dinámica del crecimiento en la nanoescala.

La inestabilidad recién descubierta corresponde a una tercera fuerza mayor en la formación de las estructuras complejas de los cristales de nieve, del mismo rango de importancia que el facetado y la ramificación. Esa fuerza encauza la morfología a gran escala de la mayoría de los cristales. Además, proporciona un mecanismo de amplificación para explicar el diagrama morfológico. Sin la inestabilidad del filo de la navaja, los cristales de nieve serían más pequeños, más gruesos o en forma de bloque, y carecerían de sus preciosas características.

Investigaciones futuras

A pesar de que la idea de la inestabilidad del filo de la navaja resulta muy atractiva, no es más que una hipótesis sin comprobar. La comprensión del crecimiento cristalino requiere ulteriores mediciones y avances teóricos. Por botón de muestra, necesitamos ahondar en el conocimiento de la superficie de hielo para explicar la dinámica molecular responsable de la cinética de adherencia dependiente de la estructura. A escala molecular, el hielo muestra fusión superficial dependiente de la temperatura, rugosidad superficial y otros fenómenos complejos. Los modelos de dinámica molecular se han abierto camino en la física de la superficie del hielo, pero nos hallamos muy lejos de poseer un conocimiento sistemático. El hielo sigue sorprendiéndonos con propiedades de superficie harto sutiles. El reto de entenderlas a escala molecular sigue en pie.

Habrá que refinar también los modelos informáticos del crecimiento cristalino. Se ha avanzado en la creación de modelos sobre la solidificación limitada por difusión. Se posee cierto dominio de la formación de patrones en esos sistemas. Mas hasta la fecha nadie ha sido capaz de desarrollar un modelo preciso del crecimiento limitado por difusión en presencia de un facetado fuerte. David Griffeath, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Janko Gravner, de la Universidad de California en San Diego, han llevado a cabo trabajos prometedores en este campo: mediante modelos de autómatas celulares tratan de emular el crecimiento limitado por difusión. En tales modelos, las reglas básicas del crecimiento cristalino se aplican de forma iterativa a los bloques de una red, para simular la formación de un cristal. Según parece, con esa técnica sencilla se evitan problemas computacionales inherentes a la resolución numérica de la ecuación de difusión. Los resultados iniciales reproducen buena parte de los aspectos del crecimiento de un cristal de nieve real.

Asimismo, debe mejorarse la precisión de las mediciones de las tasas de crecimiento cristalino y ampliar el rango de condiciones externas (temperatura, humedad, presión, etcétera). Por ejemplo, la reducción de la presión obliga a que las moléculas de agua se difundan con mayor celeridad, lo que restringe la ramificación de los cristales en desarrollo. Aún está por ver el impacto del cambio de presión en la inestabilidad del filo de la navaja.

En la actualidad estamos trabajando en nuevas técnicas que usan un crecimiento cristalino modificado eléctricamente para producir esbeltos cristales de hielo puntiagudos. Desarrollamos a continuación cristales laminares o columnares en la punta de esas agujas, bajo todo tipo de condiciones externas. Libres de corrientes de aire, estos cristales crecen más que los que se ven en la naturaleza. Hemos obtenido cristales de hasta 25 milímetros. También creamos copos de nieve de diseño, con patrones elegidos a voluntad. Grupos de la Universidad de Washington y de la estatal de Pennsylvania utilizan la levitación electrodinámica para obtener monocristales en entornos distintos.

Con datos experimentales de mayor precisión, nuevos modelos computacionales y la mejora constante en la comprensión de la dinámica molecular de la superficie del hielo, nos hallamos a un paso de contestar buena parte de las preguntas que formuló Kepler hace unos 400 años cuando se detuvo a pensar sobre las formas de los copos de nieve.

El autor

Kenneth G. Libbrecht dirige el departamento de física del Instituto de Tecnología de California. Se dedica al estudio de la actividad solar, las ondas gravitacionales y un sinfín de otros fenómenos. Su interés en el crecimiento cristalino le llevó a estudiar y fotografiar los cristales de nieve, sobre los que ha escrito varios libros.

Bibliografía complementaria

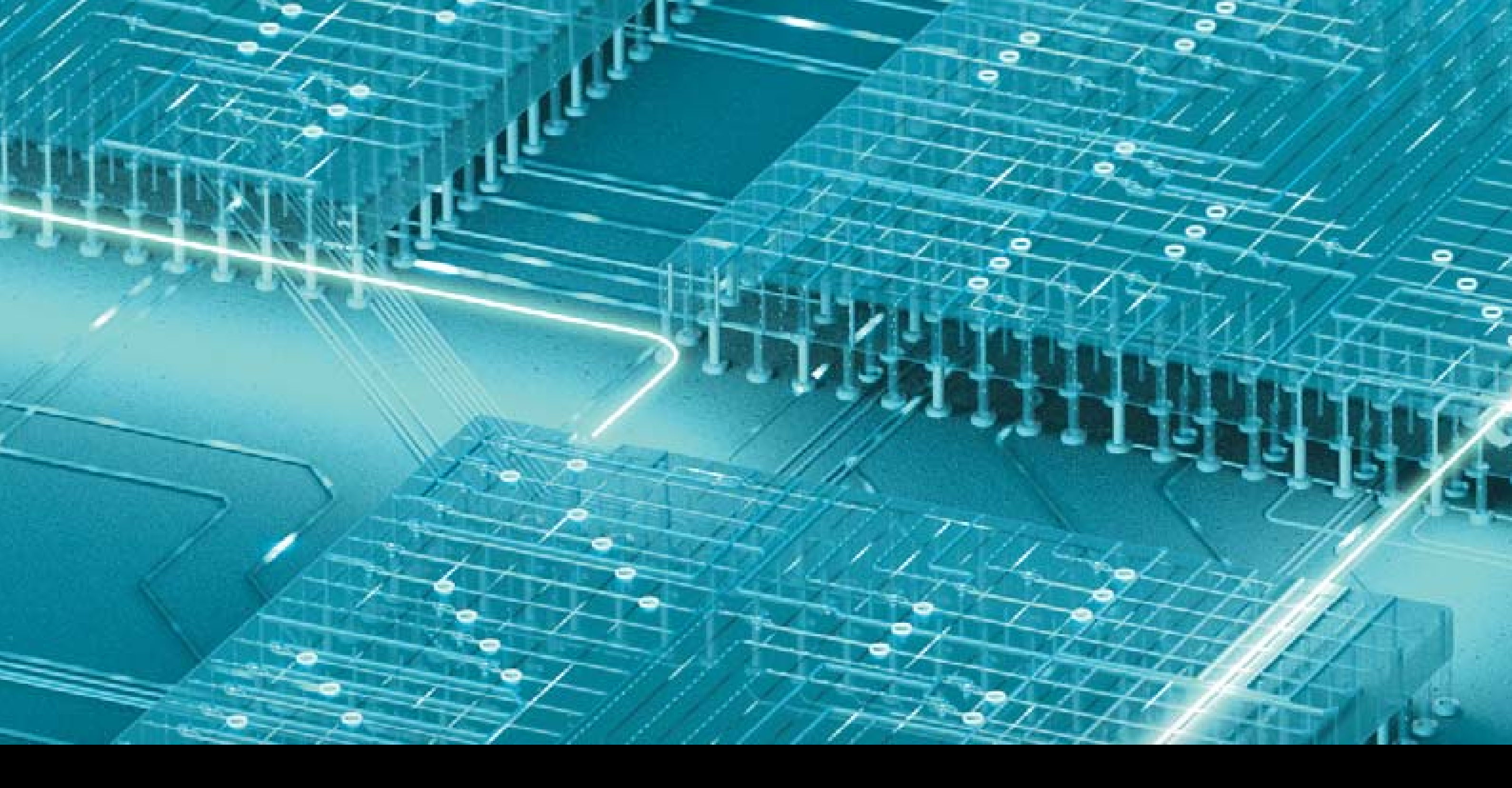
SNOW CRYSTALS: NATURAL AND ARTIFICIAL. U. Nakaya. Harvard University Press; Cambridge, 1954.

THE SIX-CORNERED SNOWFLAKE. J. Kepler. Clarendon Press; Oxford, 1966.

EXPLAINING THE FORMATION OF THIN ICE CRYSTAL PLATES WITH STRUCTURE DEPENDENT ATTACHMENT KINETICS. K. G. Libbrecht en *Journal of Crystal Growth*, vol. 258; págs. 168-175; 2003.

THE SNOWFLAKE: WINTER'S SECRET BEAUTY. K. G. Libbrecht. Voyageur Press; St. Paul, 2003.

KEN LIBBRECHT'S FIELD GUIDE TO SNOWFLAKES. K. G. Libbrecht. Voyageur Press; St. Paul, 2006.



LASERES

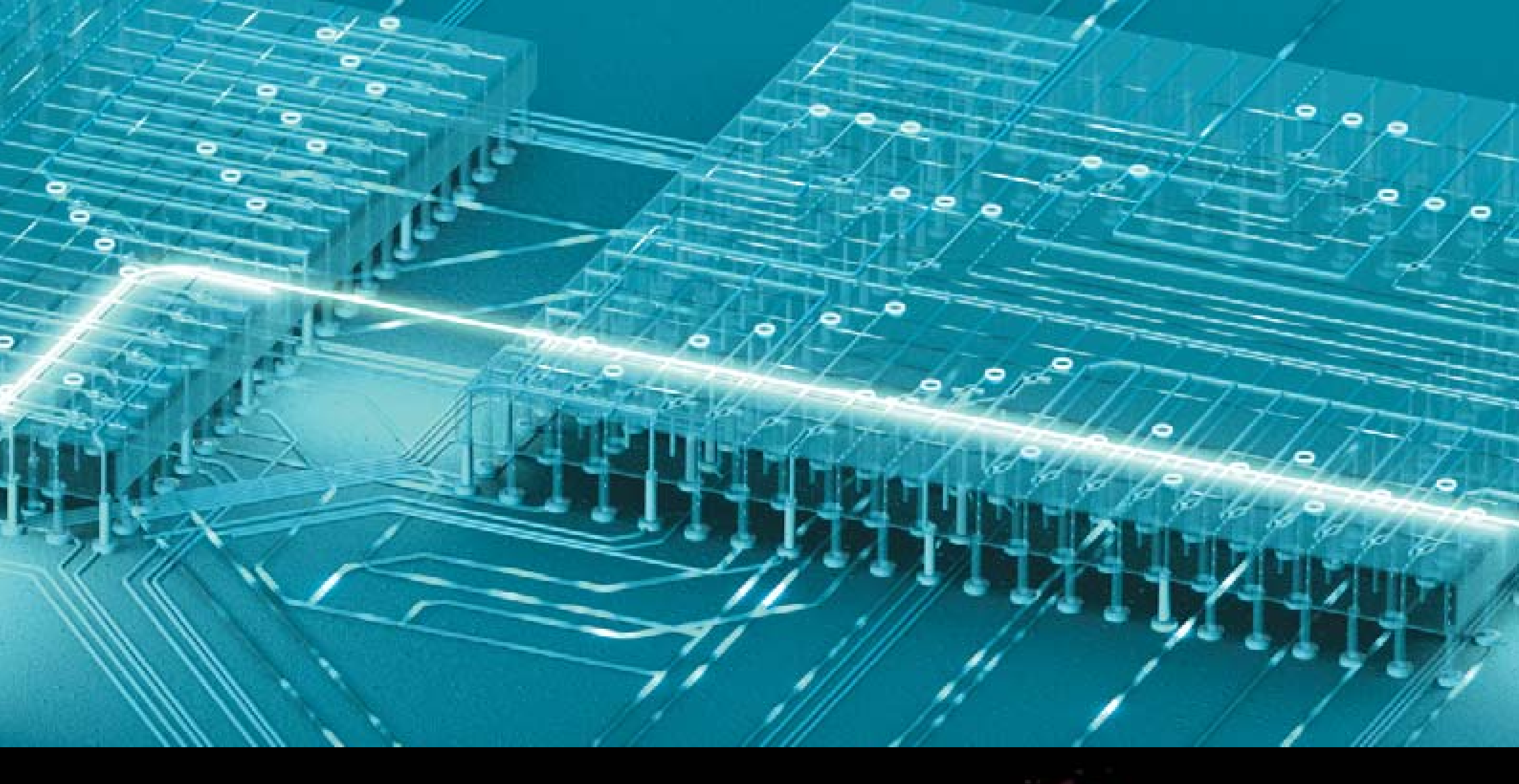
Por fin se ha logrado que el silicio emita radiación láser. En pocos años, los ordenadores y otros dispositivos electrónicos manipularán no sólo electrones, sino también luz

BAHRAM JALALI

Los chips de silicio de bajo coste facilitan la manipulación de flujos de electrones. A ellos debemos la miríada de funciones que hacen que nuestros ordenadores, teléfonos móviles y otros dispositivos electrónicos de consumo nos resulten tan útiles. Si los circuitos integrados de silicio generaran y controlaran también haces de luz, posibilitarían el desarrollo de técnicas novedosas y baratas, adaptables a múltiples aplicaciones distintas. Pero durante decenios, la propia naturaleza del silicio ha anulado los esfuerzos tenaces de los expertos para transformarlo en fuente de luz láser.

En fecha reciente, varios grupos de investigación, entre ellos el nuestro, han logrado que el silicio emita luz láser. Este hito podría comportar innovaciones de enorme interés en el campo de los dispositivos electrónicos que incorporan láseres y amplificadores ópticos, pues en la actualidad dependen de materiales generadores de radiación láser mucho más caros y exóticos que el silicio.

U.C.L.A. (*brillo de láser*); BRYAN CHRISTIE DESIGN



DE SILICIO

1. LASER (*luz blanca y roja de la letra O en el título*) obtenido a partir de un dispositivo de silicio. Emite una luz infrarroja invisible para el ojo humano (aparece con falso color en el texto). Los láseres de silicio integrados en microchips (*imagen de fondo*) abrirán las puertas a la computación óptica de bajo coste.

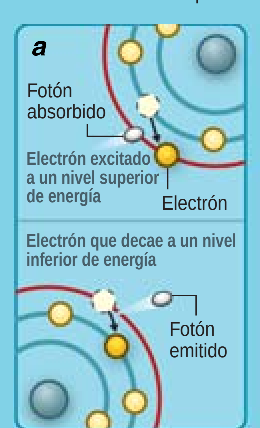
La sustitución de las tradicionales conexiones y cables de cobre por medios de transmisión ópticos elevaría en órdenes de magnitud la velocidad de transmisión de datos, en comparación con la capacidad de la técnica actual disponible. Pensemos en el módem, caballo de batalla de las conexiones domésticas a la Red, que está limitado a una velocidad de transferencia de datos de alrededor de un megaocteto por segundo. Dispositivos ópticos incorporados en los chips de silicio transferirían sin esfuerzo archivos digitales enormes, como vídeos de alta definición, a velocidades de 10 gigabits por segundo (unas 10.000 veces más rápido). Los sensores compactos que incluyan circuitos integrados con láseres de silicio combinarían las prestaciones de un laboratorio de análisis integrado en un chip con las conexiones inalámbricas para la detección de contaminantes, armas químicas o explosivos, en el contexto de redes extensas de control del medio y de seguridad. En el terreno militar, los láseres de silicio despistarían a los sensores infrarrojos de los misiles antiaéreos guiados por calor, proporcionando un sistema de contramedidas económicamente competitivo.

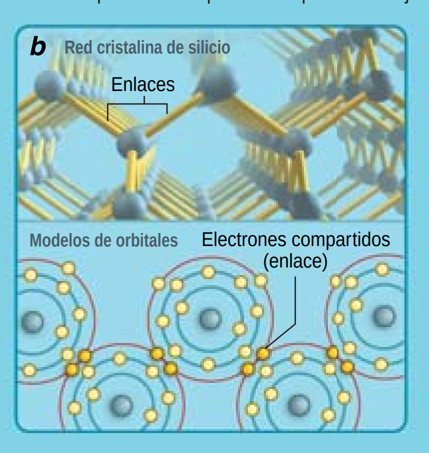
Física del láser

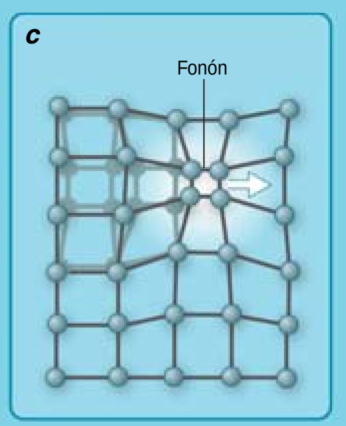
¿Qué dificultades entraña la generación de radiación láser en silicio? A diferencia de los materiales que suelen emplearse para la producción de láser (el arseniuro de galio en los reproductores de DVD, por ejemplo), el silicio no posee una estructura química que favorezca el proceso

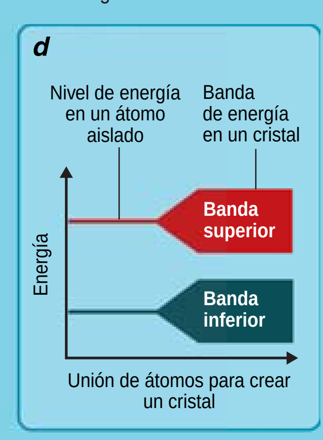
GENERACION DE LUZ LASER CON SILICIO

El silicio ofrece un potencial enorme para la computación óptica de bajo coste, pero su estructura interna no favorece la generación de luz láser.









La generación de luz láser en un medio activo se basa en el comportamiento cuántico de los electrones de las capas externas de los átomos que constituyen el material. Cuando uno de esos electrones absorbe un fotón, emigra a niveles más externos y de mayor energía; decimos que ha sido excitado (o "bombeado") (*a*). Ese electrón se deshará antes o después de la energía absorbida, para retornar a un nivel de menor energía y emitir un fotón.

En los sólidos, los átomos permanecen unidos gracias a que comparten esos electrones externos (*b*). Para conseguir que la luz se amplifique en el interior de un material —prerrequisito para la emisión láser—, una fuente externa debe suministrar energía a los electrones compartidos, de modo que salten a niveles energéticos superiores. A medida que esos electrones emiten espontáneamente fotones, al decaer a estados de menor energía, estos fotones estimulan la emisión de otros fotones por electrones todavía excitados; es decir, la luz se amplifica. La amplificación tiene lugar también cuando los electrones colisionan con fonones excitados (*c*). Los fonones corresponden a los estados cuánticos vibracionales de la red cristalina.

Cuando los átomos se agrupan en forma de cristal, los niveles energéticos de los electrones compartidos se convierten en anchas bandas de energía (*d*), en virtud del efecto colectivo del campo electromagnético que produce la presencia de muchos átomos próximos. De esta forma, cuando en un cristal se bombea un electrón, éste salta de una banda a otra de energía superior.

Cuando se representa gráficamente la energía y el momento de los electrones en un medio activo al uso (arseniuro de galio), las bandas de energía aparecen alineadas verticalmente, ya que su momento es idéntico (*gap* directo) (e). [Una banda describe los estados cuánticos posibles que pueden ocupar los electrones; cada estado se caracteriza por una cantidad que se identifica con el momento clásico; el momento total del sistema debe conservarse en los eventos de colisión.] En el silicio, en cambio, las bandas tienen momentos distintos (*gap* indirecto). Ello supone que no

en dos etapas que subyace a la emisión de un haz de luz coherente. Por un lado, no emite luz de forma eficiente cuando una fuente externa le suministra energía; por otro, es incapaz de "estimular" esa luz para producir más fotones y así amplificarla y dar lugar a un haz láser. (La palabra "laser" corresponde al acrónimo de "light amplification by stimulated emission of radiation", es decir, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.)

En un láser, una fuente de energía externa, en general radiación o una corriente eléctrica, "bombea" los electrones de los átomos del medio activo a estados, o niveles, de mayor energía (estados excitados). Cuando esos átomos vuelven a su estado de energía mínima (o fundamental), la diferencia energética entre el estado inicial y el final se devuelve en forma de fotones (unidad cuántica elemental de radiación electromagnética que se comporta indistintamente como partícula o como onda). Albert Einstein bautizó a este proceso "emisión espontánea": fenómeno que produce fotones que se propagan de forma aleatoria en cualquier dirección del espacio, dando lugar a luz difusa y de baja intensidad, al estilo de la que produce un tubo fluorescente.

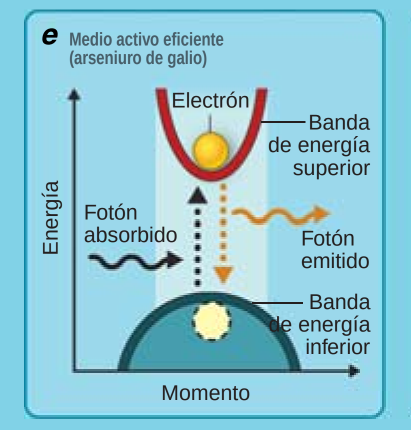
Cuando uno de esos fotones emitidos pasa a través de un grupo de electrones previamente excitados a niveles superiores de energía, se desencadena, o estimula, la emisión simultánea del exceso de energía de esos electrones en forma de radiación de la misma longitud de onda (concepto que avanzó Einstein en 1917). Al viajar juntos y sincronizados en la misma dirección, los fotones resultantes forman un haz de luz fuertemente direccional. A medida que el haz se propaga a través de otros átomos excitados, los fotones provocan la emisión en cascada de nuevos fotones. El efecto guarda semejanza con el modo en que crece una avalancha de nieve en su avance ladera abajo.

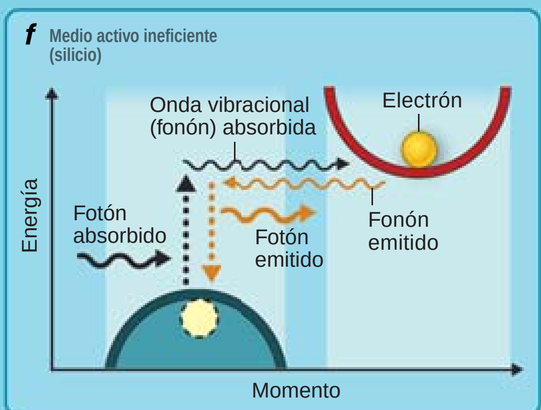
La predicción de Einstein acerca de la emisión estimulada apenas si despertó interés hasta los años cincuenta del siglo pasado, cuando los físicos empezaron a percibir las aplicaciones potenciales en dispositivos ópticos o fotónicos. En 1958, Charles Townes y Arthur Schawlow propusieron rodear parcialmente con espejos un material amplificador de la luz para reflejar hacia el interior

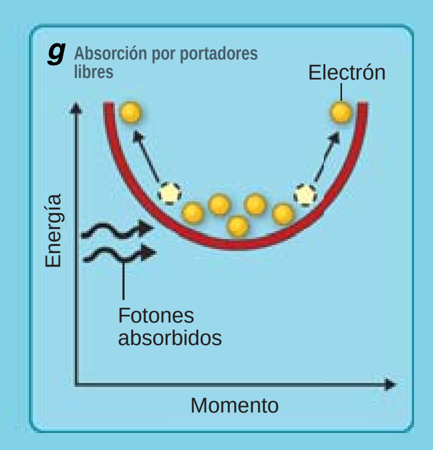
Resumen/*Láseres de silicio*

- Los científicos se proponen, desde hace largo tiempo, desarrollar un chip de silicio que manipule la luz con la misma pericia que los electrones. Pero el silicio presenta dificultades para generar luz, sobre todo luz láser. Semejante avance se aplicaría a la transferencia ultrarrápida de datos, nuevas redes de sensores y muchas otras innovaciones técnicas.
- Por fin se ha logrado, mediante distintas técnicas basadas en la manipulación de materiales, que el silicio genere luz láser. Nos encontramos ante el inminente nacimiento de una nueva técnica, la electrofotónica de silicio.

JEN CHRISTIANSEN; KEN EWARD *BioGrafx* (*b*)







basta la mera absorción de un fotón para que se produzca el salto de un electrón a una banda más energética (*f*) (los fotones que intervienen en la generación de radiación láser poseen una cantidad de momento muy inferior a la de los electrones). El electrón debe esperar a que un fonón con el momento extra adecuado se cruce en su camino y actúe como intermediario en la transferencia de energía. Desgraciadamente, esos electrones excitados pierden con frecuencia, en forma de calor, su energía adicional, que se transfiere al resto del material, antes de que aparezca el fonón esperado; de ahí que el silicio sea una fuente ineficaz de luz.

La baja eficiencia de emisión lumínica del silicio abre las puertas a un fenómeno intrabanda, la absorción por portadores libres, que dificulta la amplificación de la luz y, con ello, la emisión láser. Cuando un fotón interacciona con un electrón excitado (un portador libre) tiene lugar uno de dos procesos competitivos: o bien el fotón estimula la emisión de otro fotón, lo que provoca que el electrón decaiga a una banda de menor energía, o bien el electrón absorbe el fotón y se excita a un nivel de mayor energía dentro de la misma banda (*g*) (al no generar fotones, ese segundo proceso no favorece ni la amplificación de la luz ni la emisión láser).

En comparación con las del silicio, las bandas superiores del arseniuro de galio albergan un número restringido de electrones. Cuando se representan gráficamente, esas bandas guardan semejanza con cestos estrechos y con bordes pronunciados. Dado que el arseniuro de galio posee una tasa de emisión elevada (amplifica la luz de forma eficiente merced a la alineación de bandas), sus emisiones de fotones superan con creces las absorciones por portadores libres; ello hace que el material amplifique la luz. Cuanto más anchas las bandas superiores y menos pronunciados sus bordes, mayor es el número de electrones que se necesita para llenarlas. Así acontece con el silicio. Si a ello unimos la baja tasa de emisión (como consecuencia de la no alineación de bandas) y la alta tasa de absorción por portadores libres, entenderemos por qué el silicio no amplifica la luz.

del mismo algunos de los fotones generados. Demostraron que, en esas condiciones, el proceso de estimulación se retroalimentaba (como en una reacción en cadena). Una vez desarrollado, ese método crearía un flujo de luz intenso con una longitud de onda bien definida: esto es, un haz láser. Dos años después, Theodore Maiman presentó el primer láser operativo, que funcionaba a partir del bombeo óptico, mediante una potente lámpara, de un cristal de rubí.

El silicio se ha mostrado menos dócil que los cristales de rubí u otros materiales productores de láser desarrollados posteriormente. En los semiconductores, que presentan un comportamiento eléctrico intermedio entre los conductores excelentes (cobre) y los aislantes (caucho y materiales cerámicos), los electrones se agrupan en bandas de energía, es decir, conjuntos de niveles o estados energéticos.

Una banda describe el conjunto de niveles de energía que los electrones tienen "prohibido" o "permitido" ocupar según la teoría cuántica. Los niveles de energía entre bandas permitidas constituyen un intervalo de energías prohibidas (*band gap*). Un electrón de los orbitales externos del átomo puede absorber la energía de un fotón (con lo que salta a una banda más energética) o emitir un fotón y perder la energía correspondiente (con lo que decae a una banda menos energética). Estas interacciones se engloban dentro de los fenómenos de dispersión o colisión (*scattering*).

Imaginemos las bandas de energía como una serie de cestos en los cuales reposan los electrones. En condiciones normales, los electrones permanecen, en su mayoría, en la banda o cesto de menor energía; la de mayor energía permanece prácticamente vacía. Pero cuando un fotón con energía igual o mayor que el intervalo de energía prohibida colisiona con un electrón, éste asciende a la banda superior: el electrón salta del cesto más bajo a uno más alto. Este fenómeno de absorción de luz constituye la base de la conversión de luz en electricidad que se produce en los paneles solares.

Para que un material emita fotones, debe recibir energía suficiente y así excitar un gran número de electrones desde la banda de menor a la de mayor energía o, en otras palabras, provocar una "inversión de la población" (se la conoce con tal denominación por comparación con la distribución electrónica normal). No es necesario que se exciten todos los electrones del material, basta con los que se hallan próximos al borde superior de la banda energética inferior. La forma usual de excitar esos electrones consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de un diodo semiconductor. También la iluminación del material con una fuente de luz externa (como hizo Maiman) "bombea" los electrones a la banda superior.

Una vez excitados, algunos de esos electrones retornan a la banda inferior, devolviendo, en forma de fotones, la energía que absorbieron. Cuando esos fotones viajan a través de un semiconductor excitado con muchos electrones en la banda superior (inversión de población), se estimula la emisión de más fotones. En el mejor de los casos, la emisión de luz del semiconductor iguala la

energía absorbida de la fuente de bombeo.

Aunque en los procesos de absorción y emisión se produce un intercambio energético entre electrones y fotones, la energía total del sistema se conserva: el gasto iguala los ingresos, como exige la ley de conservación de la energía. Pero la absorción y emisión deben cumplir también la ley de conservación del momento. El momento de un fotón, que si viaja (como una onda) a través de un cristal se determina directamente a partir de la longitud de onda, se interpreta como la tendencia que tiene a seguir viajando en la misma dirección. Los fotones que intervienen en la generación de radiación láser poseen una cantidad de momento muy inferior a la de los electrones; por ello, cuando un fotón colisiona con un electrón, el momento de éste apenas se modifica. Por tanto, el bombeo de un electrón funciona mejor cuando las bandas de energía superior e inferior (puntos de inicio y fin de la transición electrónica interbanda) tienen el mismo momento.

Esta igualdad de momento entre bandas ocurre en el arseniuro de galio, el fosfuro de indio y los otros semiconductores que se utilizan hoy para la producción de luz láser. Si se representa en una gráfica energía en función de momento, las bandas de energía quedan alineadas. El alineamiento de bandas (*gap* directo) facilita la transferencia energética directa entre un electrón y un fotón. Que un material presente esa propiedad depende de la disposición de los átomos en su red cristalina.

El silicio, por el contrario, no muestra dicha alineación. Debido a una estructura cristalina no óptima, exhibe una importante diferencia de momento entre sus bandas superior e inferior (*gap* indirecto). Por tanto, la colisión con un fotón difícilmente llevará un electrón a la banda superior. Antes bien, el electrón debe aguardar a que aparezca una onda vibracional (fonón) de la red cristalina del silicio con el momento apropiado para proporcionarle el "empujón" extra necesario; el fonón viene a ser el intermediario de la transferencia energética. Desgraciadamente, la mayoría de los electrones excitados del silicio pierden en forma de calor la energía suministrada por bombeo óptico mientras esperan la llegada del fonón adecuado. De ahí la baja eficiencia de emisión del silicio: sólo uno de cada millón de electrones excitados genera la emisión de un fotón. En comparación, los materiales productores de láser comunes (arseniuro de galio, por ejemplo) presentan rendimientos de emisión 10.000 veces superiores.

La no alineación de bandas (*gap* indirecto) limita la eficiencia de la emisión, pero no la impide. Otros dos factores, también intrínsecos al silicio, entran en juego. El primero es la absorción por portadores libres, un proceso que se desarrolla en el interior de una banda de energía dada. Imaginemos un grupo de electrones (portadores libres) que se han "bombeado" a una banda de energía superior. Cuando un fotón interactúa con uno de ellos, pueden ocurrir dos procesos: uno favorable a la emisión láser, el otro desfavorable. El fotón puede originar que el electrón decaiga a una banda de menor energía, con lo que se emite otro fotón y se contribuye a la amplificación de la luz. O bien, el fotón puede ser absorbido por el electrón, el cual pasará entonces a un nivel energético superior dentro de la misma banda; con ello no se genera otro fotón, ni, por tanto, se produce amplificación de la luz incidente. El ritmo al que estos dos procesos competitivos ocurren depende del número de electrones que se han "bombeado" a la banda superior.

En los buenos productores de láser (el arseniuro de galio, por ejemplo), las bandas, o cestos, superiores son estrechas y con bordes pronunciados, de forma que albergan un número reducido de electrones. El silicio, en cambio, presenta bandas anchas y con bordes de poca pendiente, que requieren un número mayor de electrones para llenarse. Cuando se bombea, el silicio tiende a la absorción por portadores libres. El arseniuro de galio presenta una tasa de emisión elevada (la amplificación de la luz es muy eficiente debido a la alineación de bandas); ello hace que las emisiones de fotones superen con creces a las absorciones por portadores libres. En el silicio, la limitada tasa de emisión (consecuencia del no alineamiento) combinada con la elevada tasa de absorción por portadores libres se traduce en una ausencia de amplificación de la luz.

Otro proceso, la recombinación Auger, se opone a la emisión láser del silicio. En este fenómeno, un electrón de la banda superior no emite un fotón, sino que cede su energía a otros electrones, que seguidamente se liberan, en forma de calor, del exceso de energía. La cantidad de energía luminosa perdida por esta vía depende del número de electrones en la banda superior. El silicio experimenta mayor número de recombinaciones Auger que el arseniuro de galio, ya que necesita bombear una cifra mayor de electrones a la banda superior para compensar su bajo rendimiento emisor.

Confinamiento cuántico

En los últimos cinco años, los expertos han empezado a encontrar caminos para sortear los obstáculos que plantea la producción de luz láser en el silicio. Uno de los métodos para aumentar la emisión de luz saca provecho del confinamiento cuántico, un intrigante fenómeno que tiene lugar cuando el movimiento de un electrón se ve limitado en una o más direcciones. Si la restricción de movimiento es tridimensional, lo que se conoce como una celda cuántica, la agitación del electrón en el interior de la celda aumenta a medida que el tamaño de la celda mengua. El efecto corresponde a una manifestación del principio de incertidumbre de Heisenberg, que establece que cuanto más localizado esté un electrón, su velocidad y, por tanto, su momento (el producto de la masa por la velocidad) son más indeterminados. Al aumentar la indeterminación, se relajan los requisitos de conservación del momento que gobiernan la transferencia de energía entre electrón y fotón, con lo que se dispara la tasa de emisión de luz.

Para obtener una celda cuántica para el silicio, se genera una capa delgada de vidrio de sílice (dióxido de silicio); en su interior se alojan minúsculos fragmentos de silicio cristalino. Esos nanocristales, que se iluminan (para bombear sus electrones) con una fuente externa, presentan una anchura de escasos átomos: las dimensiones apropiadas para provocar el confinamiento cuántico.

En el año 2000, el grupo de Lorenzo Pavesi, de la Universidad de Trento, aportó los primeros datos de am-

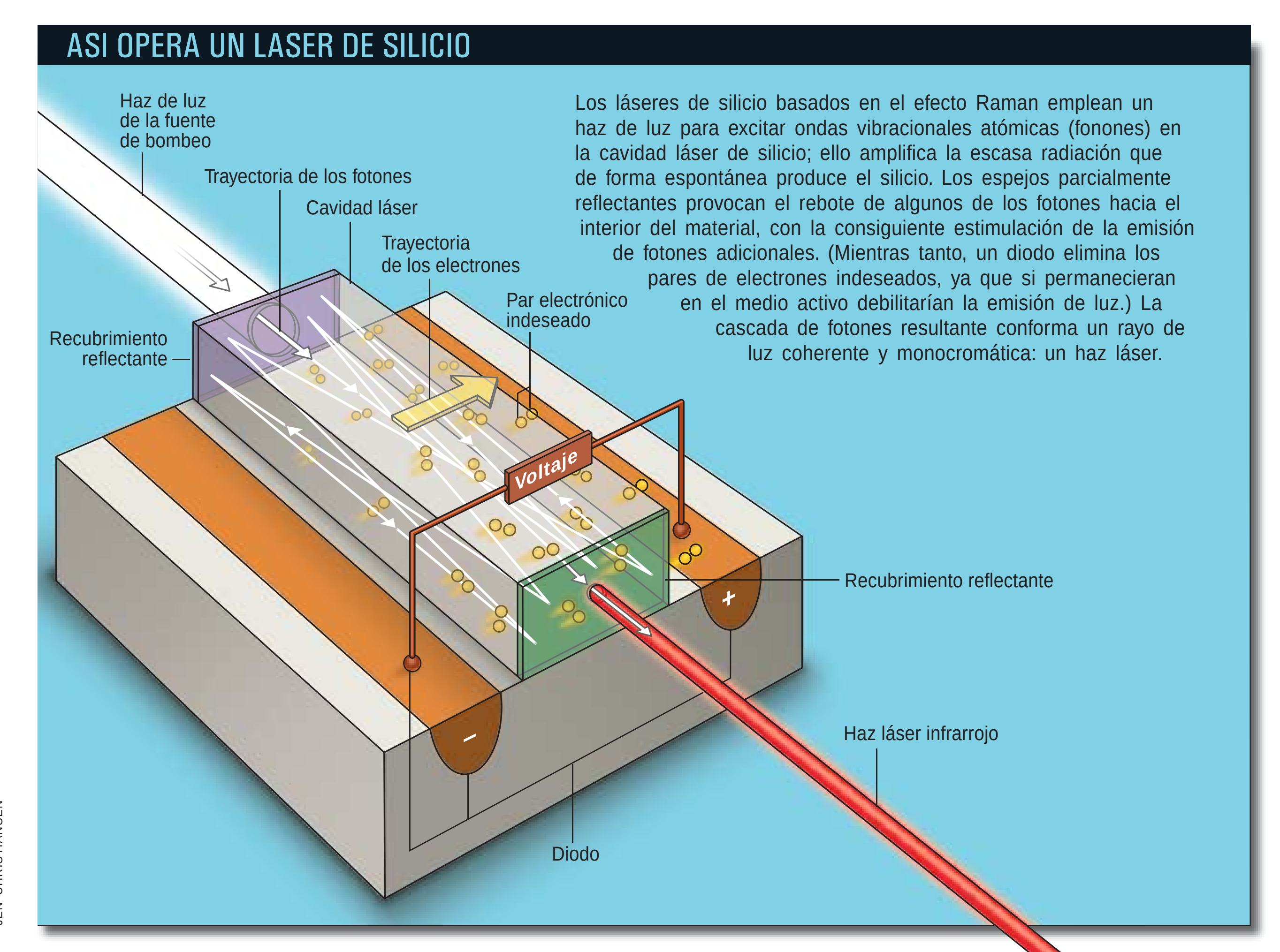
plificación de la luz en nanocristales de silicio. La comunidad científica recibió la noticia con escepticismo. Sin embargo, Philip Fauchet, de la Universidad de Rochester, y muchos otros posteriormente confirmaron los resultados. Aunque esta técnica no ha logrado todavía un sistema láser, ha inspirado otros métodos que han logrado resultados alentadores.

Uno de los avances basados en el confinamiento cuántico emplea elementos del grupo de las tierras raras, como el erbio, conocidos por su notable rendimiento en la fotoemisión. Los fabricantes de dispositivos ópticos añaden erbio de forma rutinaria a los vidrios de las fibras ópticas para crear amplificadores y láseres bombeados por luz para redes de telecomunicaciones. Francesco Priolo, de la Universidad de Catania, y Salvatore Coffa, de ST-Microelectronics, han seguido ese camino para mejorar el comportamiento óptico del silicio. El grupo de Coffa ha creado diodos emisores de luz (LED) que operan a temperatura ambiente con un rendimiento equiparable al de los dispositivos construidos a partir de arseniuro de galio.

El LED de ST-Microelectronics es un sándwich de metal-vidrio-semiconductor; un voltaje entre metal y semiconductor acelera los electrones a través del vidrio. A medida que se desplazan en su interior, esos electrones bombean los electrones de los átomos de erbio alojados en el vidrio; ello provoca que éstos emitan luz. En este caso, el confinamiento cuántico en los nanocristales desempeña una función modesta: incrementa la conductividad eléctrica del vidrio de forma que se reduce el voltaje necesario para establecer la corriente de electrones a su través. Aunque la técnica LED resulta de suma utilidad, produce luz difusa, vía emisión espontánea en vez de láser generada por emisión estimulada. Los investigadores de ST-Microelectronics pronostican para un futuro cercano la emisión láser a partir de silicio dopado con erbio.

En fecha reciente, el grupo de James Xu, de la Universidad de Brown, ha observado la emisión láser a bajas temperaturas (–230 ºC, demasiado baja para aplicaciones de uso común) en silicio nanoestructurado. El efecto se produce mediante el bombeo óptico de la superficie de una capa delgada de silicio en la que se ha generado un entramado de agujeros separados 110 nanómetros. Xu y su equipo atribuyen la emisión láser a los electrones localizados en los defectos estructurales que aparecen de forma natural en las superficies cristalinas de las nanoestructuras de silicio. En concreto, el aumento en la emisión se debe a la incertidumbre cuántica que la fuerte localización de los electrones produce en el momento. Esos materiales auguran perspectivas excitantes para los nanoláseres de silicio, que ofrecen no sólo la emisión láser, sino también la capacidad de operar como un refinado sistema de espejos y filtros para manipular la luz generada. Tales dispositivos podrían ser de gran utilidad en las futuras redes de comunicaciones [*véase* “Cristales fotónicos”,

ASI OPERA UN LASER DE SILICIO



Los láseres de silicio basados en el efecto Raman emplean un haz de luz para excitar ondas vibracionales atómicas (fonones) en la cavidad láser de silicio; ello amplifica la escasa radiación que de forma espontánea produce el silicio. Los espejos parcialmente reflectantes provocan el rebote de algunos de los fotones hacia el interior del material, con la consiguiente estimulación de la emisión de fotones adicionales. (Mientras tanto, un diodo elimina los pares de electrones indeseados, ya que si permanecieran en el medio activo debilitarían la emisión de luz.) La cascada de fotones resultante conforma un rayo de luz coherente y monocromática: un haz láser.

JEN CHRISTIANSEN

por Eli Yablonovitch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2002].

Efecto Raman

Bombear electrones hasta la banda de energía superior de un cristal semiconductor no constituye el único camino hacia la amplificación de luz. Los expertos buscan otras rutas para la obtención de láseres de silicio. Por ejemplo, si se añade energía a los fonones de un semiconductor cristalino, un débil haz luminoso que viaje a través de la red cristalina capta esa energía y se amplifica. Haciendo pasar por el cristal, de nuevo, parte de esa luz intensificada se obtiene un láser.

En 2002 y 2003, con el respaldo de la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Defensa de los EE.UU., mi grupo de la Universidad de California en Los Angeles demostró que un chip de silicio generaba y amplificaba luz por medio de esa técnica. En 2004, presentamos el primer láser de silicio. Lo mismo que Maiman, utilizamos un sistema de bombeo óptico, lo que suele resultar poco eficiente. Para sorpresa de todos, nuestro dispositivo de silicio convirtió la energía de bombeo en luz, con un rendimiento próximo al obtenido con los láseres al uso. Poco después, incorporamos el dispositivo láser en un diodo. Logramos así controlar (activar y desactivar) por medios eléctricos la emisión.

La interacción entre luz y fonones corresponde al efecto Raman. El fenómeno se empleó en los años sesenta y setenta del siglo pasado para caracterizar las propiedades físicas de materiales muy dispares, incluido el silicio. En fecha más reciente, los ingenieros lo han aplicado a las fibras ópticas para que operen como amplificadores y láseres. Dado que se necesitan varios kilómetros de fibra óptica para lograr la emisión láser, los expertos habían descartado esta técnica como vía para la obtención de un chip de láser de silicio. Olvidaban, sin embargo, que el efecto Raman en el silicio puede ser 10.000 veces mayor que en las fibras ópticas, fabricadas con vidrio. Esta respuesta incrementada resulta de la estructura atómica ordenada de los cristales de silicio, en última instancia una propiedad inherente al silicio que favorece la emisión de radiación láser. En cambio, la disposición aleatoria de los átomos en el vidrio amorfo de las fibras ópticas limita el efecto Raman.

Un láser Raman requiere bombeo óptico. Para evitar un número excesivo de electrones en la banda superior del silicio que impedirían la emisión de luz (debido a la absorción por portadores libres), nuestro grupo excitó el silicio mediante radiación infrarroja con una longitud de onda de 1500 nanómetros. Se mantenía así la energía de los fotones por debajo del intervalo de energías prohibidas, de manera que los electrones no alcanzaban la banda superior. De forma ocasional, no obstante, dos fotones pueden ceder simultáneamente su energía para que un electrón pase a la banda superior. Aunque los electrones que experimentan este proceso son relativamente escasos, detraen energía para la emisión láser.

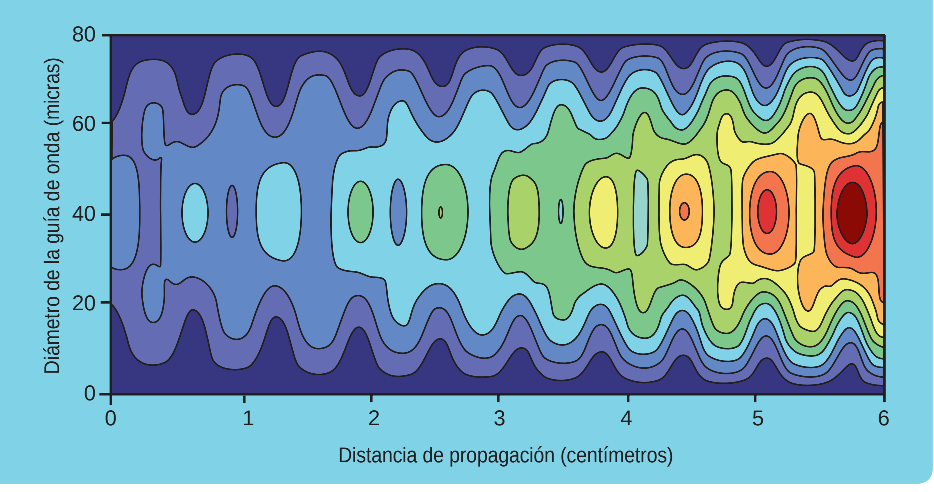
Los láseres basados en el efecto Raman no son los únicos que sufren este tipo de pérdidas de energía. En 2006, Alexander Gaeta y Michal Lipson, de la Universidad de Cornell, presentaron un dispositivo que amplifica la luz mediante la mezcla de ésta con un haz de luz más intenso. Este amplificador, así como el correspondiente y aún inédito láser, experimentarán el mismo tipo de pérdidas que un sistema basado en el efecto Raman.

Para evitar tales pérdidas, nuestro primer láser operaba en modo pulsado; ello impedía que los electrones se acumularan y vaciaran el sistema de energía. Para funcionar en modo continuo, se aplica un campo eléctrico (creado por un diodo adyacente) que elimina esos electrones. Un grupo de la Universidad de Hong Kong sugirió el ensayo de esta técnica. Haisheng Rong y sus colaboradores en Intel presentaron los resultados en 2005.

La investigación reciente revela que se trata de un método sólo parcialmente eficaz, pues la tasa de eliminación de electrones queda limitada por la velocidad máxima que las partículas alcanzan en el silicio (una milésima parte de la velocidad

Amplificación de imágenes mediante láser de silicio

En una fibra óptica (o guía de onda) con una sección mayor que la longitud de onda de la luz incidente, cualquier patrón de distribución de luz se enfoca y desenfoca a medida que se propaga por el conducto; ello se debe a las interferencias constructivas y destructivas que se producen cuando las ondas luminosas se reflejan en las paredes de la guía de onda. Este efecto de focalización se combina con la amplificación óptica para conseguir de forma simultánea el enfoque y la amplificación de una imagen cuando la luz recorre la guía de onda (*los colores más cálidos hacia la derecha de la gráfica*). Un grupo de investigadores de la Universidad de California en Los Angeles en colaboración con otros de la compañía de Northrop Grumman están desarrollando un dispositivo en el cual el efecto Raman (interacción entre fotones y fonones) amplifica una imagen conforme ésta se propaga a través de una guía de onda de silicio de gran diámetro. Este amplificador de imágenes debería mejorar la sensibilidad de sistemas remotos para la detección y tratamiento de imágenes, basados en la emisión láser, que se emplean para el control ambiental.



U.C.L.A./NORTHROP GRUMMAN

de la luz). Además, se requiere una potencia eléctrica notable.

Para nuestra fortuna se conocen algunas estrategias que mejoran la eficiencia de un láser de silicio: el bombardeo del silicio con protones y la adición de pequeñas cantidades de platino obligan a los electrones a volver rápidamente a la banda inferior de energía, en vez de consumir, vía absorción por portadores libres, los escasos fotones presentes.

Estos procesos reducen el número de electrones en la banda superior, lo que minimiza la reabsorción de la luz generada. Pero la eliminación de esos electrones resuelve sólo una parte del problema. Los dispositivos pierden energía, aun cuando esos electrones se generan de forma involuntaria. Mediante la aplicación de cierto ardid a la operación de las células fotovoltaicas, demostramos en 2006 que los láseres Raman de silicio generan electricidad a partir de la recolección de la energía de bombeo perdida. La estrategia consiste en hacer fluir a través del dispositivo, generando electricidad, los electrones que de forma ocasional se excitan a la banda superior por la absorción de dos fotones.

El flujo de electrones en cuestión se organiza de forma que el consumo eléctrico del dispositivo (el producto de la intensidad de corriente por el voltaje) sea negativo, lo que significa que genera potencia eléctrica. Esta electricidad se utiliza luego para alimentar los circuitos electrónicos que se alojan en el mismo chip.

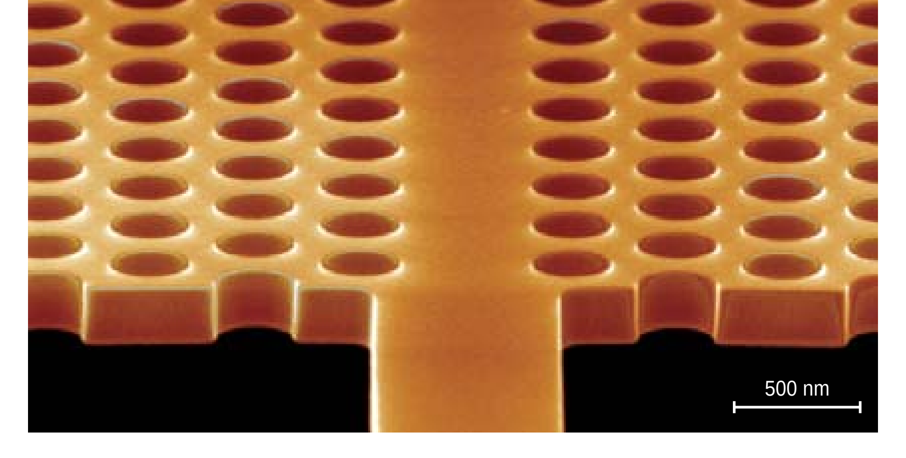
Tamaño inconveniente desaparece por completo si la longitud de onda del bombeo óptico es mayor de 2300 nanómetros, como demostramos posteriormente en nuestro laboratorio. En ese caso, la energía de los fotones de bombeo es tan pequeña, que ni siquiera dos de esos fotones logran bombear un electrón a la banda superior, lo que resultaría perjudicial para un láser de tipo Raman.

Hemos descubierto que el silicio se convierte en un excelente medio activo, de hecho uno de los mejores, cuando se bombea con luz infrarroja de longitud de onda entre 2300 y 7000 nanómetros (más allá empiezan a aparecer otros efectos perniciosos para la emisión). Esta zona del espectro queda fuera del alcance de los láseres al uso; así pues, la técnica del láser de silicio favorecerá el desarrollo de nuevas aplicaciones hasta ahora vedadas.

Circunscribiéndonos a todos los materiales capaces de emitir luz láser, el silicio ofrece una de las mejores combinaciones de conductividad térmica (para eliminar el calor indeseado) y resistencia al daño cuando se somete a intensidades ópticas elevadas. Se trata, pues, de un material ideal para la generación de haces láser superintensos.

También se encuentra en fase de desarrollo cierta técnica híbrida muy prometedora para la producción de láseres de silicio. Consiste en incorporar arseniuro de galio o fosfuro de indio sobre un sustrato de silicio. Tradicionalmente, los expertos se han resistido a estas técnicas híbridas, ya que la adición de otros materiales modifica las propiedades eléctricas del silicio; esos otros materiales se consideran contaminantes. No obstante, resultados recientes obtenidos por grupos de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, y, por separado, por un equipo de investigadores de Intel y la Universidad de California en Santa Bárbara, han auspiciado un renovado interés por estas técnicas. Si las investigaciones superan los problemas de incompatibilidad de los materiales, el método podría aportar, a corto plazo, otra vía para la producción comercial de láseres de silicio.

La infatigable búsqueda del láser de silicio empieza a cosechar réditos. Por fin, los resultados en este campo de investigación parecen haber alcanzado la masa crítica que permitirá al silicio desafiar la primacía de los medios activos tradicionales. Ese progreso debería producir de forma inevitable la convergencia de la fotónica y la electrónica. Aunque es temprano para adivinar el camino que seguirá el campo recién nacido de la electrofotónica, las aplicaciones de los láseres de silicio habrán de transformar nuestra vida cotidiana.



2. EMISION LASER A BAJAS TEMPERATURAS en una capa delgada de silicio. La superficie del dispositivo se ha perforado con agujeros de tamaño nanométrico separados unos 110 nanómetros. La emisión láser tiene lugar como consecuencia del confinamiento cuántico de los electrones en las celdas electrónicas creadas en la superficie del silicio.

IBM RESEARCH

El autor

Bahram Jalali es profesor de ingeniería eléctrica en la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas Henry Samueli de la Universidad de California en Los Angeles.

Bibliografía complementaria

COMPUTACIÓN A LA VELOCIDAD DE LA LUZ. W. Wayt Gibbs en *Investigación y Ciencia*, n.º 341, págs. 60–67; febrero, 2005.

OPTICAL GAIN AND STIMULATED EMISSION IN PERIODIC NANOPATTERNED CRYSTALLINE SILICON. S. G. Cloutier, P. A. Kossyrev y J. Xu en *Nature Materials*, vol. 4, n.º 12, págs. 887–891; diciembre, 2005.

OPTICAL INTERCONNECTS: THE SILICON APPROACH. Dirigido por L. Pavesi y G. Guillot. Springer Series in Optical Sciences. Springer, 2006.

SILICON PHOTONICS: THE STATE OF THE ART. Graham Reed. John Wiley & Sons, 2007.

La evolución de los lepidosaurios

Lagartos, serpientes y esfenodontes integran el grupo de los lepidosaurios, cuyo origen se retrotrae más allá de los dinosaurios. La evolución de los lepidosaurios en el hemisferio septentrional tuvo un curso distinto del seguido en el austral

Sebastián Apesteguía

Las aves se inscriben entre los dinosaurios. Y los dinosaurios entre los reptiles. Considerados en su conjunto, los reptiles integran el grupo que aporta mayor diversidad a los vertebrados terrestres. Existen unas 15.400 especies vivas y numerosísimas fósiles.

Entre los reptiles vivos, son los lepidosaurios uno de los grupos más amplios. Por su anatomía pertenecen al tipo de reptiles diápsidos, cuyos cráneos poseen dos barras óseas y dos ventanas a cada lado para el paso de la musculatura masticatoria. La historia de los lepidosaurios se puede rastrear hasta principios del Triásico, hace unos 250 millones de años, cuando los seres vivos empezaban a reponerse de uno de los episodios de extinción más terribles, el de la transición del Pérmico al Triásico.

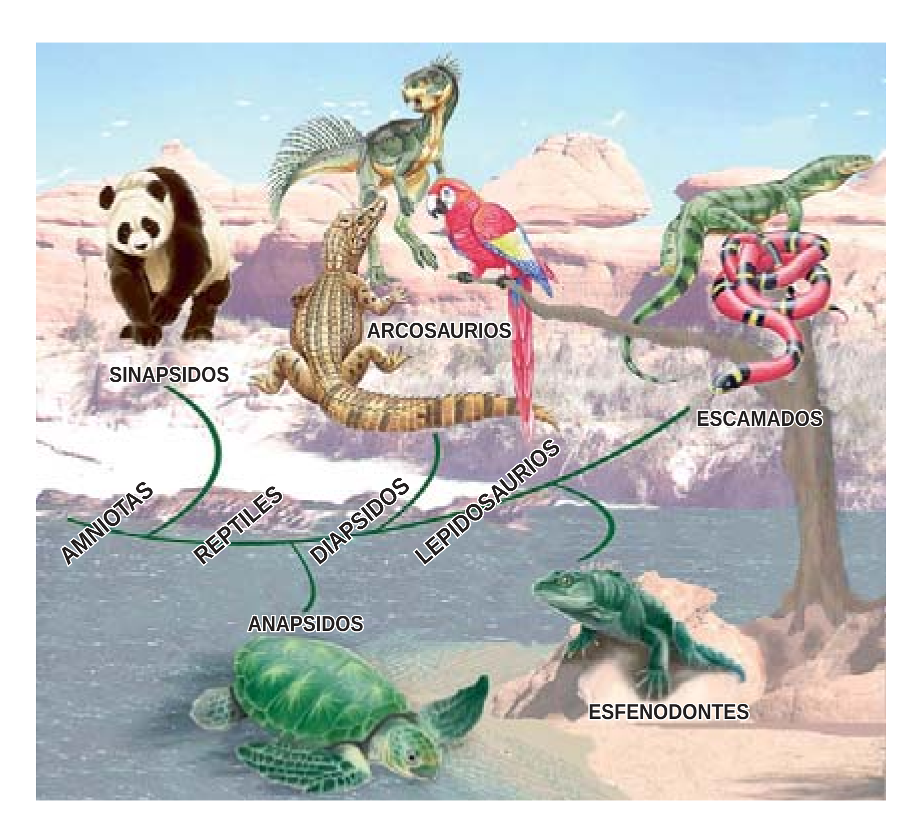


Antes de que los dinosaurios se adueñaran de los ecosistemas terrestres, los lepidosaurios ya iban poblando el antiguo supercontinente de Pangea, donde se incrementó la diversidad de sus especies y la amplitud de sus adaptaciones y rasgos anatómicos. El linaje de los lepidosaurios proviene de precursores paleozoicos, entre los que hubo formas corredoras, como *Paliguana* y *Saurosternon*, y planeadoras, como *Kuehneosaurus* e *Icarosaurus*. Sin embargo, los hitos principales de la historia de los lepidosaurios tuvieron lugar con posterioridad a la extinción permo-triásica, a principios de la era Mesozoica coincidió con el origen de mamíferos, dinosaurios y tortugas (el Mesozoico abarcó desde hace 65 hasta hace unos 250 millones de años).

Los Lepidosauria se dividen en dos linajes principales: los esfenodontes o Sphenodontia, muy numerosos entre el Triásico y mediados de la era Mesozoica, y los escamados o Squamata, los lagartos y serpientes, cuyo

1. LOS PRIOESFENODONTES, lepidosaurios de un metro de largo, vivieron en la Patagonia argentina durante los inicios del Cretácico Tardío. Como su pariente el tuatara de Nueva Zelanda, poseían un pico cortante e hileras dentarias dobles en el paladar.

JORGE A. GONZALEZ



2. LOS AMNIOTAS, los vertebrados mejor adaptados a la vida terrestre, nos dividimos por parentesco en varios grupos naturales; los principales, los sinápsidos (que incluyen a los mamíferos) y los reptiles. Entre los reptiles la mayor división se da entre los anápsidos y los diápsidos, que a su vez se dividen en arcosaurios (cocodrilos y dinosaurios) y los lepidosaurios (esfenodontes y escamados).

JORGE A. GONZALEZ

registro fósil se inicia a principios del Jurásico y abarca desde entonces parte sustantiva de los vertebrados terrestres.

Esfenodontes

Los esfenodontes constituyen un grupo de reptiles de aspecto primitivo, emparentados con los lagartos. Se originaron durante el período Triásico, a comienzos de la “era de los Dinosaurios”, hace unos 240 millones de años. Sólo sobrevive el “tuatara” (*Sphenodon*), en reducido número y con dos especies, *S. punctatus* y *S. guntheri*, restringidas al archipiélago de Nueva Zelanda. Por su carácter de “fósil viviente” y su anatomía poco especializada constituye la referencia obligada en anatomía comparada de los reptiles, en filogenia y en evolución inicial de los reptiles diápsidos.

Los esfenodontes abundaron en número y diversidad específica durante los períodos inicial y medio del Mesozoico. Sus restos fósiles se han hallado en rocas del Triásico Medio (hace entre unos 230 y 245 millones de años) al Jurásico Temprano (hace entre unos 175 y 200 millones de años) de diversas regiones del mundo (Gran Bretaña, China, América del Norte, Brasil, etcétera). Durante ese lapso, los esfenodontes, de un tamaño que rara vez superaba los veinte centímetros, se hicieron comunes entre la fauna de vertebrados continentales. La variedad de sus denticiones y mandíbulas permite concederles distintos hábitos alimentarios: insectívoros, carnívoros, piscívoros, herbívoros o frugívoros. Unos poseían escudos óseos; otros presentaban cuerpos alongados para la natación y hocicos angostos para la pesca.

El registro fósil se torna escaso en las rocas del Jurásico Tardío (hace unos 145-161 millones de años) y sobre todo en las del Cretácico Temprano (hace unos 100-145 millones de años). Los hallazgos se reducen a unos pocos restos aislados, lo mismo en Gondwana (Africa) que en Laurasia (América del Norte, Europa).

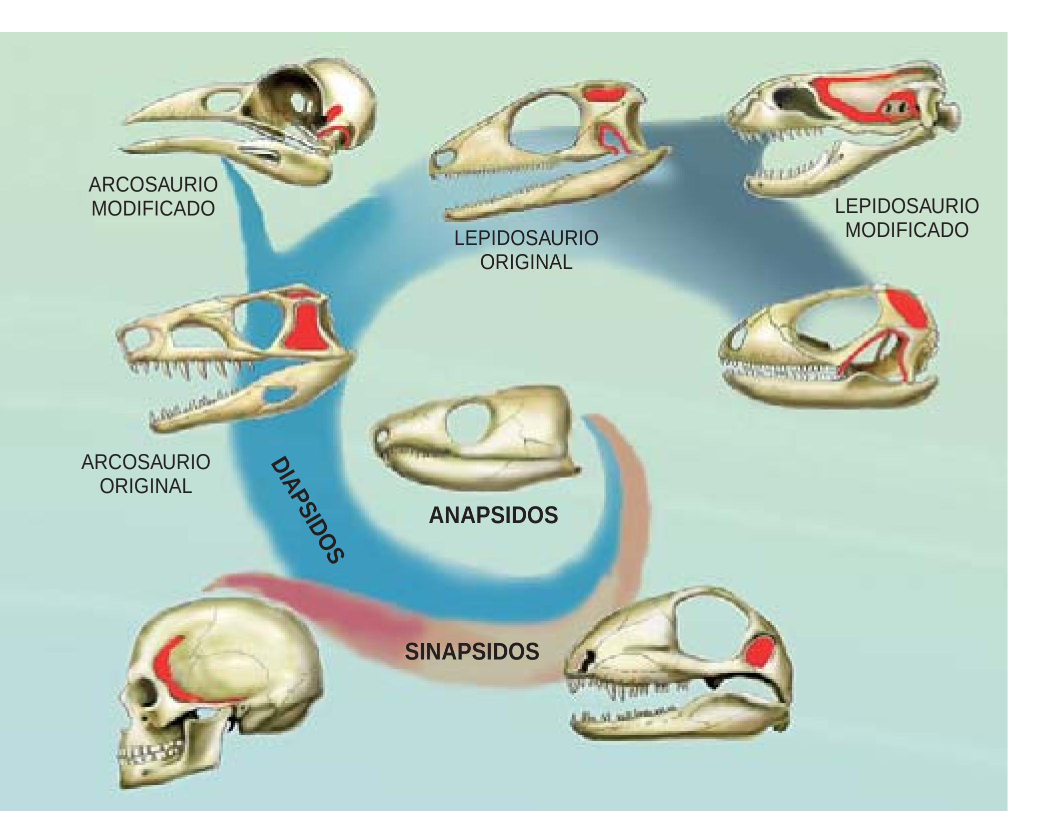
Parece que la expansión a comienzos del Cretácico de los escamados, es decir, los verdaderos lagartos y las serpientes actuales, guardó relación con la reducción de la diversidad y la abundancia numérica de los esfenodontes del hemisferio norte, que condujo a la extinción del grupo en esa región. Creíase que idéntico fenómeno se repitió en el hemisferio austral, pues no se conocían restos de esfenodontes en el registro fósil desde fines del Cretácico Temprano hasta su reaparición en materiales casi contemporáneos a nuestra época provenientes de Nueva Zelanda.

Priosphenodon

Así estaban las cosas hasta que se halló un buen número de grandes esfenodontes en La Buitrera, yacimiento fosilífero del noroeste de la Patagonia. Desenterré esqueletos completos en 1999, en el marco de un proyecto dirigido por Fernando E. Novas sobre las rocas de la Formación Candeleros, un afloramiento geológico de principios del Cretácico Superior (hace unos 65-100 millones de años). Fueron los primeros registros mundiales del grupo para el Cretácico Superior. Se cubría así en parte un extenso hiato evolutivo. Se han recuperado ya decenas de especímenes, muchos de ellos en óptimo estado de conservación, con individuos de distintas edades.

En nuestros días, los rojos paredones de La Buitrera cortan la estepa patagónica mostrándonos finas capas de arena consolidada, depositadas allí por antiguos ríos, que recorrieron esa parte de Sudamérica durante los inicios del Cretácico Superior, hace unos 90 millones de años. Tras surcar una pradera, fluían hacia el Pacífico; la cordillera de los Andes aún no existía. Los esfenodontes deambulaban entonces a la sombra de los mayores dinosaurios conocidos, así el carnívoro *Giganotosaurus*, de 14 metros de largo y dientes como puñales, y titanosaurios primitivos, gigantescos herbívoros emparentados con el *Brachiosaurus*.

Otros integrantes de la misma fauna, aunque más pequeños, eran los araripesuquios, cocodrilos terrestres del tamaño de una iguana, omnívoros, con grandes dientes caniniformes; los orificios nasales en la parte frontal de un largo hocico les daban un aspecto algo zorruno. Serpientes



3. LA ESTRUCTURA CRANEANA permite reconocer relaciones de parentesco entre los vertebrados terrestres, aunque medien modificaciones adaptativas notables. Los sinápsidos presentan un puente en la región temporal, que limita una abertura (*abajo, derecha, en rojo*) difícil de ver en humanos (*abajo, izquierda*). El cráneo homogéneo de los reptiles anápsidos (*centro*) se contrapone a las dos barras de los diápsidos, que bordean ventanas para el paso de musculatura (*centro, izquierda*). Ya los primeros lepidosaurios mostraban una barra inferior incompleta (*arriba, centro*), que se altera considerablemente en los escamados (*arriba, derecha*).

terrestres, con minúsculos restos de patas, y pequeños y veloces dinosaurios carnívoros acechaban a los abundantes mamíferos driolestoideos, con cráneos de apenas cuatro centímetros. En las orillas de lagunas, tortugas acuáticas emparentadas con la actual *Acantochelys* se alimentaban de peces, entre los que destacaban los dipnoos o peces pulmonados.

Priosphenodon posee un cráneo compacto y triangular, con un agudo pico frontal y dientes pequeños y triangulares dispuestos muy apretadamente, lo que le valió ese nombre, que proviene de tres palabras griegas: sierra-cuña-diente. Su dentición y los indicios de movimientos mandibulares hacia delante y atrás (propalinalidad) permiten suponer una dieta herbívora. Aunque con cautela: el único lepidosaurio propalinal de nuestros días, el tuatara, es carnívoro.

Los esfenodontes de La Buitrera se cuentan entre los mayores del mundo: más de un metro de longitud y su cráneo de 15 centímetros; pensemos que los pleurosaurios y los safeosaurios, esfenodontes marinos de picos aguzados y estilizados cuerpos, poseen cráneos que sólo rondan los 10 centímetros. La masa corporal de *Priosphenodon* contrasta con la acostumbrada en la mayoría de los esfenodontes conocidos, que no superen los 20 centímetros de longitud.

Los restos de esfenodontes hallados en La Buitrera llenan un vacío en el registro fósil entre los restos fragmentarios de principios del Cretácico y el tuatara vivo de Nueva Zelanda. Además, favorecen la hipótesis de que la supervivencia de esfenodontes en ese archipiélago del océano Pacífico forma parte de la historia y distribución de un extenso grupo de reptiles que habitaba el supercontinente Gondwana. Hipótesis respaldada también por los fósiles encontrados por Trevor Worthy, de Paleofaunal Surveys, en el Mioceno de Nueva Zelanda.

La historia del grupo en Gondwana merece particular atención. Si bien se repartieron en el Triásico por todo el mundo, los linajes de esfenodontes fueron ramificándose en distintas especies a lo largo del Jurásico y Cretácico Temprano, con el progreso de la fragmentación de Pangea en Gondwana y Laurasia. Ello explica la presencia de esfenodontinos en el Jurásico y Cretácico Temprano de América del Norte y Europa, y en el Pleistoceno de Nueva Zelanda. Los eilenodontinos, linaje al que pertenece *Priosphenodon*, provienen de rocas del Jurásico Superior y Cretácico Inferior de Estados Unidos y, por último, del Cretácico Superior de Patagonia.

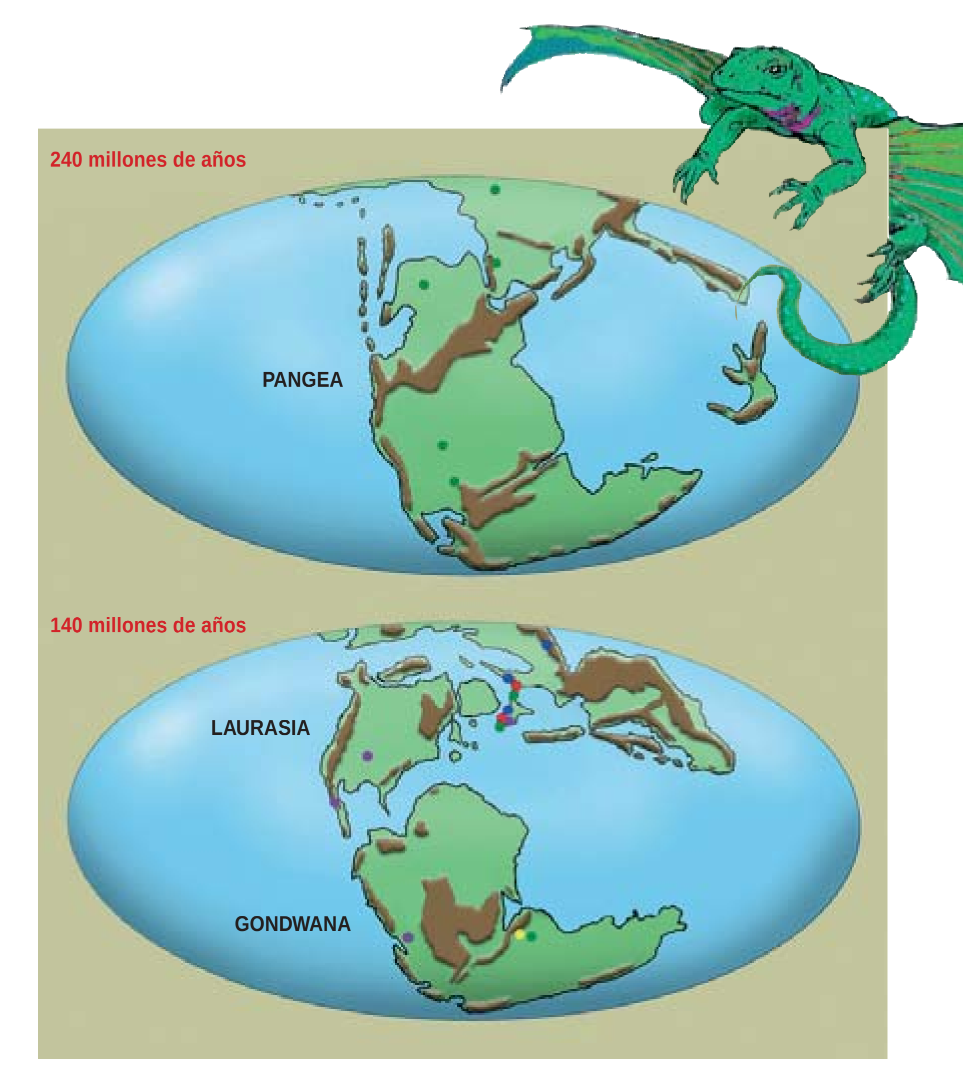
La búsqueda de materiales de esfenodontes en sedimentos de fines del Cretácico Superior (hace 67 millones de años) permitió al autor hallar restos en dos localidades patagónicas más, que ratificaron la supervivencia de los esfenodontes en Patagonia al menos hasta las postrimerías del Cretácico.

Su casi total ausencia en el registro fósil terciario y su supervivencia limitada a las islas de Nueva Zelanda nos llevan a suponer que los esfenodontes fueron una de las víctimas de la extinción de fines del Cretácico, la misma que eliminó a los dinosaurios no avianos. Debió de causar una extrema mortandad de estos lepidosaurios. Su supervivencia habría estado ligada, nuevamente, a la plasticidad evolutiva del grupo, cuyo representante actual demuestra una inusual tolerancia a las zonas frías: se siente cómodo a unos 12 grados centígrados, temperatura que la actividad de otros lepidosaurios no tolera.

Sphenodon cuenta con la barra temporal inferior completa, adaptación propia de esfenodontes avanzados. Este puente óseo, que conecta la región del cráneo donde el hueso cuadrado de la mandíbula se articula con el hueso yugal, refuerza la región, de modo que pueda aplicarse un corte más poderoso y se posibilite su masticación propalinal característica. En esa operación se requiere un cráneo

JORGE A. GONZALEZ

4. EL SUPERCONTINENTE PANGEA (*arriba*) se formó entre fines de la Era Paleozoica y principios de la Mesozoica. Lo conformaban casi todos los continentes. En aquel tiempo, los primeros lepidosauromorfos planeadores, el *Icarosaurus* (*arriba, derecha*) por ejemplo, habían originado los primeros lepidosaurios, que se distribuyeron por todo el mundo. Los círculos verdes representan hallazgos triásicos de esfenodontes clevosaurios. Al disgregarse Pangea en un megacontinente al norte y otro al sur durante el Jurásico (*abajo*), ambas masas continentales se llevarían representantes de varios linajes. Se indican con círculos verdes (esfenodontes clevosaurios y safeosaurios), violetas (esfenodontes opistodontes y esfenodontinos), amarillos (escamados iguanios), rojos (escamados escincomorfos) y azules (escamados anguimorfos), para un lapso entre el Jurásico Temprano y el Medio.



JORGE A. GONZALEZ; DISEÑO DE MARIANO SANSIBIERI

rígido, pues la mandíbula se desliza adelante y atrás encarrilada entre los huesos maxilar y palatino. En algunos linajes de esfenodontes se logró mediante el desarrollo de la barra temporal inferior (esfenodontinos); en otros, mediante una expansión de la barra superior (eilenodontinos).

Escamados

Los escamados agrupan lagartos y serpientes. Se encuentran hoy representados por unas seis mil especies, repartidas en seis tipos principales: iguanios (agamas, camaleones e iguánidos), escincomorfos (paramacelódidos, cordiloideos, escincoideos, lacertoideos y teioideos), anguimorfos (anguioideos, varanoideos, monstersaurios y mosasauroideos), gecos, anfisbenas, dibámidos y serpientes. Se debate si estas últimas deben ser incluidas o no en uno de los grupos mencionados.

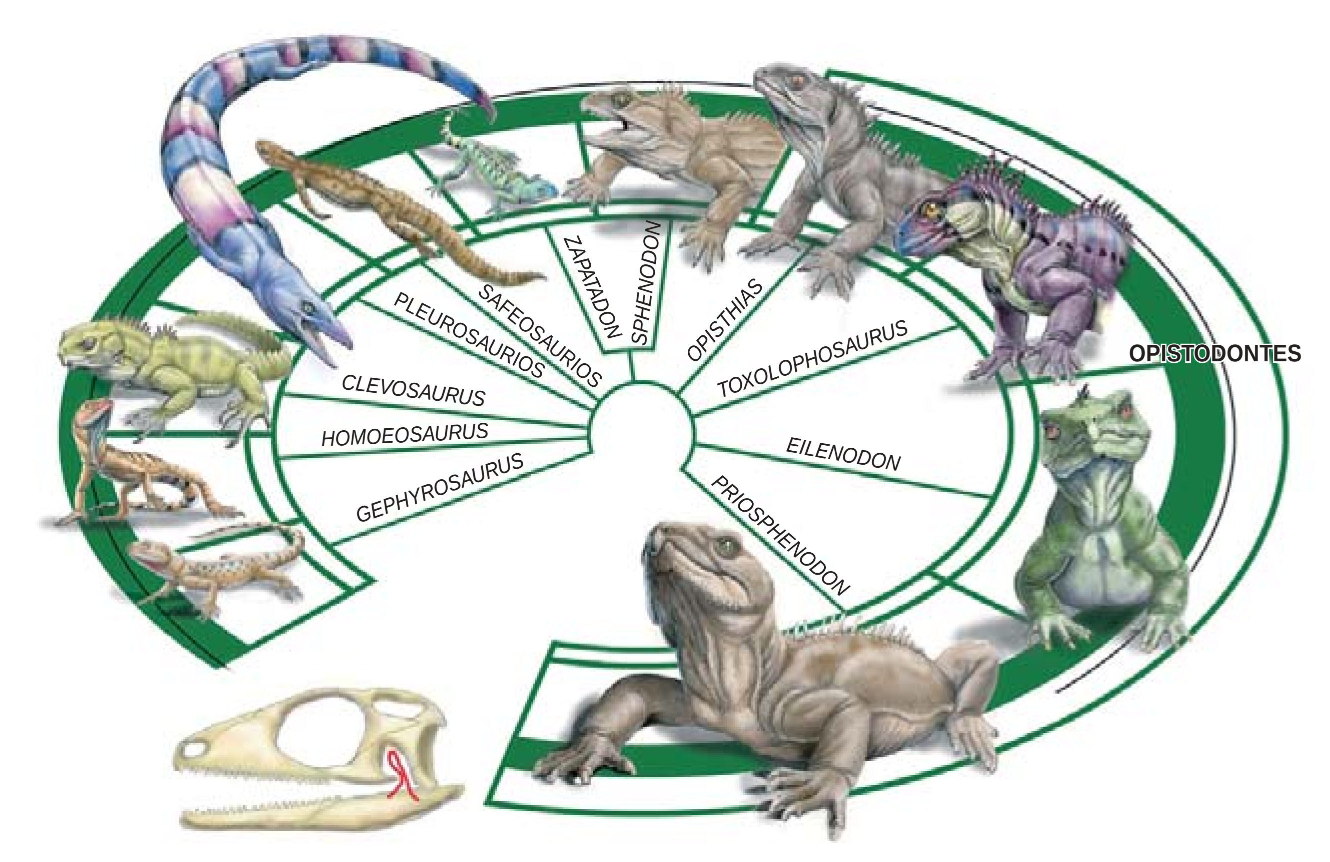
Dotados de un cráneo con una articulación entre los huesos frontales y parietales, la articulación mesocinética, los escamados poseen una notable movilidad del hueso cuadrado (estreptostilia) en el que se articula la mandíbula. Los machos portan un par de hemipenes, un rasgo de peso en la sistemática del grupo. Aunque ovíparos en su mayoría, abunda también entre ellos el ovoviviparismo (la hembra retiene los huevos y pare vivas a sus crías).

Hacia fines del Triásico, los primeros escamados se habían distribuido por Pangea. Sus formas más primitivas, o basales, se hallaban diversificadas en ambos hemisferios cuando se produjo la disgregación de Laurasia y Gondwana. Restos de escamados con características muy primitivas se han hallado en Brasil (*Olindalacerta*, *Tijubina*), México (*Huehuecuetzpalli*), Estados Unidos (*Schilleria*), España (*Scandensia*) y Baviera (*Bavarisaurus*, *Eichstaettisaurus*). Los fósiles más antiguos provienen del Jurásico Inferior de la India (*Barathagama*). Con excepción de los iguanios, los demás grupos de escamados han exhibido a lo largo de la evolución una recurrente tendencia al alargamiento del cuerpo y la pérdida de extremidades, por lo que resulta difícil saber cuándo se originaron las serpientes. Antes de que terminase el Jurásico y se produjera la fragmentación de Pangea, los escamados se habían diferenciado en al menos tres grupos: los iguanios, los escincomorfos y los anguimorfos, que se distribuyeron por un mundo casi desprovisto de barreras marinas.

Lagartos iguanios

Se admite que los iguanios constituyen el grupo más primitivo de escamados vivientes. De origen controvertido, el reciente descubrimiento de *Barathagama rebbanensis* en el Jurásico Temprano de India y la amplia distribución actual de los iguanios en el hemisferio sur respaldan, con todo, una procedencia gondwánica (o al menos de la región sur de Pangea). Los iguanios incluyen formas hoy muy repartidas por el Viejo Mundo (agamas), algunas de filiación más claramente gondwánica (camaleones) y otras sobre todo sudamericanas (iguánidos); estas últimas alcanzaron tardíamente Centroamérica y Norteamérica. Los iguánidos de Madagascar (oplurinos) se hallarían en su área de distribución original desde los tiempos de la Gondwana Mayor (la parte extraafricana del supercontinente Gondwana).

Aunque los iguanios capturan sus presas con la lengua, han desarrollado



5. LOS ESFENODONTES son uno de los principales grupos de lepidosaurios. Si bien están hoy sólo representados por el tuatara (*Sphenodon*) de Nueva Zelanda, fueron muy diversos y variados durante la era Mesozoica; se conocen formas nadadoras y terrestres, pequeñas y grandes. Creíase antaño que muchas características de *Sphenodon* eran comunes en los lepidosaurios primitivos y propias de los esfenodontes (*dentición acrodonte, barra temporal inferior completa*), pero el registro fósil ha enseñado que los esfenodontes originales no las poseían.

JORGE A. GONZALEZ; DISEÑO DE MARIANO SANSIBIERI

diversos tipos dentarios. Los más primitivos son de dentición pleurodonte, es decir, las piezas se apoyan en un surco en la cara interna de las mandíbulas; otros, de dentición acrodonte, con los dientes adheridos al hueso mismo de la mandíbula, como ocurre en los esfenodontes avanzados. En el hombre, los dientes se encuentran implantados en las mandíbulas (tecodontes). Dado que en los esfenodontes primitivos hay dientes en posición pleurodonte, es posible que en los escamados sea esa la condición original y la acrodoncia desarrollada por algunos iguanios se deba a una adaptación secundaria de agamas y camaleones. En algunas agamas puede haber una combinación de ambas denticiones.

Los iguánidos, iguanios pleurodontes, comprenden especies insectívoras (primitivas) y especies herbívoras terrestres, arborícolas y semimarinas. Entre los diversos linajes de iguánidos se incluyen los basiliscinos, los iguaninos, los esceloporinos, los crotafitinos, los tropidurinos, los oplurinos, los morunasaurios y los anoloideos. No podemos determinar si los iguánidos actuales conforman un grupo natural, si descienden de un precursor común. La dentición pleurodonte por la que se les reúne en un grupo, podría representar sólo la conservación de un carácter desde los primeros lepidosaurios y no una innovación.

Los basiliscinos, de América central y del sur, presentan una cabeza crestada; algunos pueden correr bípedos sobre el agua. Los iguaninos se desenvuelven en hábitats muy dispares, de los desiertos a las selvas de la América tropical y las islas Fidji; poseen cortas lenguas y largas colas, así como un abundante colorido y ornamentación, que incluye crestas, placas e hileras de escamas redondeadas. Aunque de dieta herbívora, los juveniles pueden alimentarse también de insectos.

Los esceloporinos (o frinosomátidos) son terrestres, a menudo de cuerpo achatado y ovíparos, y habitan en Centroamérica y Norteamérica hasta el sur de Canadá. Los crotafitinos, pequeños lagartos depredadores de los roquedales del sur de Norteamérica y norte de México, emiten sonidos y corren a dos patas entre las rocas.

Los tropidurinos son lagartos de tamaño entre pequeño y mediano que pueblan Sudamérica, incluidas la Tierra del Fuego, las islas Galápagos y el Caribe. En general, presentan una variada ornamentación, a veces con colas espinosas o crestados. Sus exhibiciones territoriales o sexuales se atienen a un comportamiento estereotipado. Los hay insectívoros, omnívoros y hasta herbívoros. Aunque la mayoría son ovíparos, también los hay vivíparos; las crías permanecen cerca de los padres.

Los oplurinos son lagartos ovíparos de Madagascar y las islas Comoro, algunos de colas espinosas, que miden entre 20 y 40 cm de longitud. Los morunasaurios (u hoplocércidos) son pequeños lagartos insectívoros nocturnos de las selvas de Sudamé-

AMERICA DEL SUR

ARGENTINA

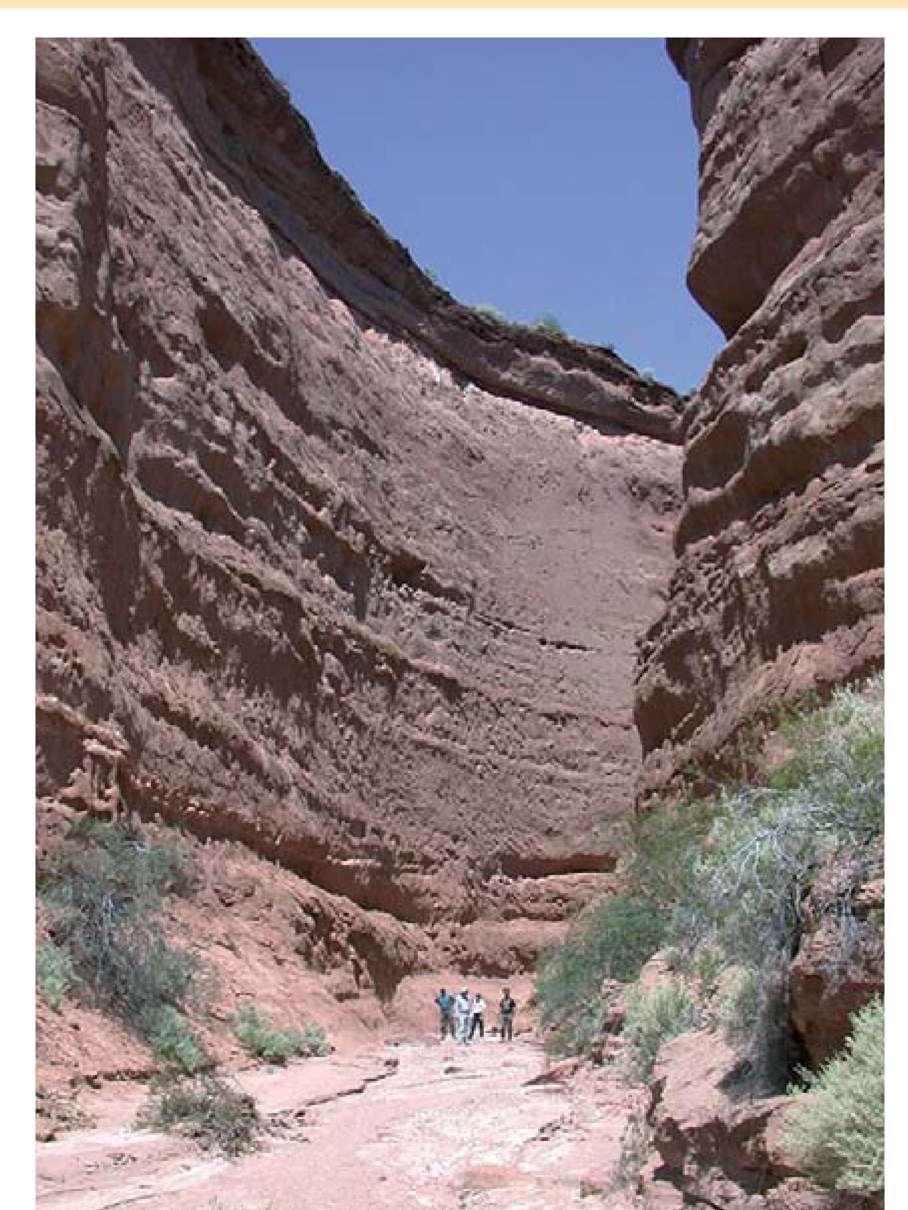
69° 00'
68° 15'
39° 00'
39° 00'
PROVINCIA DE NEUQUEN
ARROYITO
RIO LIMAY
EL CHOCON
237
PROVINCIA DE RIO NEGRO
LAGO E. RAMOS MEXIA
RENTERIA
LA BUITRERA
0
15
30 km
CERRO POLICIA
39° 45'
39° 45'
69° 00'
68° 15'

6. "LA BUITRERA" es un yacimiento fosilífero del norte de la provincia de Río Negro, Argentina, donde trabaja el autor desde 1999. Sus altos paredones morados, donde anidan los "jotes" o buitres, son depósitos de un viejo río que desembocaba en el Pacífico antes de que existiera la cordillera de los Andes.

SEBASTIAN APESTEGUIA *(mapa)*; HUGO CORBELA *(fotografía)*

rica y Centroamérica. Los anoloideos integran un grupo de lagartos ovíparos, mayormente insectívoros, de Sudamérica, que han invadido el Caribe y el sur de Norteamérica. Incluyen formas arborícolas y gráciles como los anolis, mientras que los matuastos son terrestres y robustos.

Entre los iguanios acrodontes se encuentran las agamas y los camaleones. Las agamas incluyen lagartos terrestres y diurnos de tamaño mediano a grande, en general ovíparos y con llamativas adaptaciones, como las alas membranosas del *Draco* de Indonesia, el collar desplegable del *Chlamydosaurus* australiano o las grandes espinas del *Moloch*. Algunos de ellos pierden la cola como una estrategia de distracción. El corte se produce en la zona entre dos vértebras, mientras que en otros lagartos se produce por la quebradura





7. UNA PEQUEÑA LAGARTIJA iguánida tropidurina del género *Liolaemus* se asoma por una hendidura en la roca rojiza cretácica de "La Buitrera".

de una vértebra. Puede parecer una diferencia nimia, pero indica que esas adaptaciones han tenido orígenes independientes, que no se han heredado de un ancestro común. Aunque insectívoros en su mayoría, hay agámidos herbívoros (*Uromastyx*).

Los camaleones, cazadores acrodontes, han adquirido una capacidad mimética arquetípica, Exhiben una amplia movilidad ocular que les permite una visión estereoscópica en el momento de disparar su lengua pegajosa para cazar.

Lagartos escincomorfos

Los escincomorfos constituyen un grupo extenso de lagartos estilizados, de dentición pleurodonte, a menudo acorazados, de huesos parietales fusionados y orificio pineal situado entre la articulación móvil de los huesos craneanos frontal y parietal. Su amplio registro fósil incluye formas del Jurásico Medio de Kirtlington, Inglaterra, y del Jurásico Superior de Guimarota, Portugal, de Solnhoffen, Baviera, de Kazajstán y de Estados Unidos. Para el Cretácico Inferior, se los ha registrado en la región de Purbeck, Inglaterra, en Las Hoyas, España, en Höövör, Mongolia y en las formaciones Cloverly y Antlers de Estados Unidos.

Entre el Cretácico Inferior y el Superior se asiste a un importante cambio faunístico. Un número elevado de especies asiáticas —mamíferos, dinosaurios y lagartos— entran en América del Norte por Beringia. Tras la invasión los esfenodontes norteamericanos terminan por extinguirse. Entre los escincomorfos del nuevo conjunto, se han registrado para comienzos del Cretácico Superior los teioideos *Dicothodon*, *Bicuspidon* y *Harmodontosaurus*, así como el escincoideo *Dimekodontosaurus* y los cordiloideos *Pseudosaurillus* y *Bothriagenys*. Excepto los paramacelódidos, todos los grandes grupos de escincomorfos (cordiloideos, escincoideos, lacertoideos y teioideos) están representados hoy.

A los paramacelódidos, lagartos de placas rectangulares, se les adscribe a la primera radiación de escincomorfos. Albergan formas del Jurásico Tardío de América del Norte y Asia (*Sharovisaurus* y *Mimobecklesius*) y Cretácico Temprano de Inglaterra y América del Norte (*Paramacellodus, Atokasaurus, Tepexisaurus*). La presencia de paramacelódidos en Africa sugiere que evolucionaron antes de la separación de Laurasia y Gondwana.

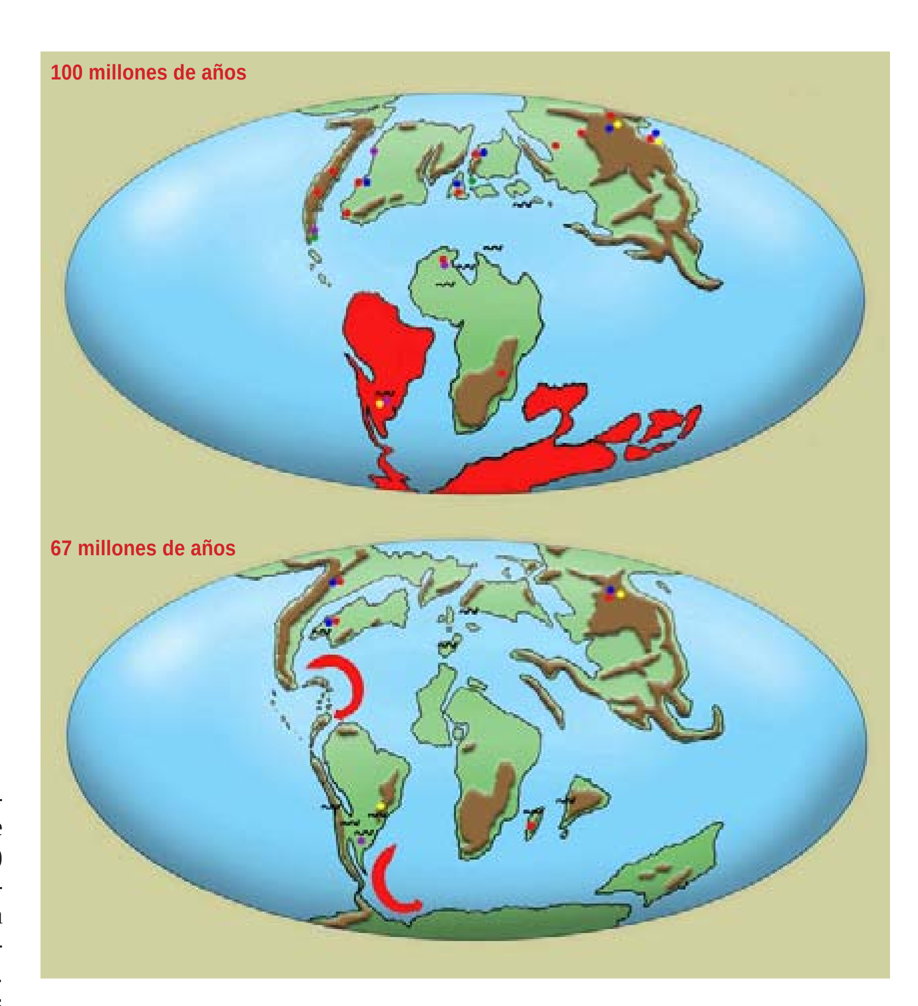
El grupo de los cordiloideos incluye formas fósiles. Hoy está representado por los cordílidos y los gerrosáuridos. Los cordílidos, robustos lagartos vivíparos de ambientes áridos del Africa subsahariana, de un tamaño entre pequeño y mediano, son omnívoros u oportunistas; algunos exhiben una tendencia a la reducción de miembros. En el dorso y la cola suelen tener escudos dispuestos en anillos, así como grandes espinas, que faltan en sus parientes, los pequeños ovíparos gerrosáuridos del sur africano y Madagascar. La presencia del cordiloideo *Konkasaurus* en sedimentos del Cretácico más tardío de Madagascar, de hace unos 70 millones de años, sugiere que este grupo tuvo cierta importancia en los ecosistemas terrestres gondwánicos.

8. LOS HALLAZGOS EN LA BUITRERA incluyen docenas de esqueletos de prioesfenodontes, junto con restos de serpientes con patas, cocodrilos terrestres, tortugas, diversos dinosaurios y mamíferos.

JIM HOLSTEIN (*arriba*); JORGE A. GONZALEZ (*abajo*)



9. A MEDIADOS DEL CRETACICO, los continentes del hemisferio sur se dispusieron de modo tal, que la Gondwana Mayor (*arriba, en rojo*), quedó intercomunicada. Los hallazgos representados corresponden al lapso entre el Jurásico Tardío y el Cretácico Medio. Hacia fines del Cretácico Tardío (*abajo*), América del Norte quedó unida a América del Sur y ésta a la Antártida; las faunas se mezclaron en ambos sentidos (*flechas rojas*). Al mismo tiempo, las mezclas se dieron también entre las regiones del norte africano, España y el resto de Europa. Los hallazgos se marcan con círculos verdes (esfenodontes clevosaurios y safeosaurios), violetas (esfenodontes opistodontes y esfenodontinos), amarillos (escamados iguanios), rojos (escamados escincomorfos) y azules (escamados anguimorfos). Las líneas onduladas representan serpientes.



JORGE A. GONZALEZ; DISEÑO DE MARIANO SANSIBIERI

Los escincoideos fósiles se conservan en rocas del Cretácico de Norteamérica (*Dimekodontosaurus*) y Asia (*Hymenosaurus*, *Parmeosaurus*; los eslavoidos proceden de Asia (*Eoxanta* y *Slavoia*). Las formas vivas reciben el nombre de escíncidos. De hábitos diurnos, estos lagartos carnívoros conocen una distribución mundial. Sus cráneos, cubiertos de placas, son alargados y algo chatos. Un extenso paladar secundario les permite respirar mientras comen; tienen una lengua ancha y de extremo espinoso, en algunos casos, como el de *Tiliqua*, de color azul. Algunos escíncidos de miembros reducidos representan quizás una reversión del estado ápodo.

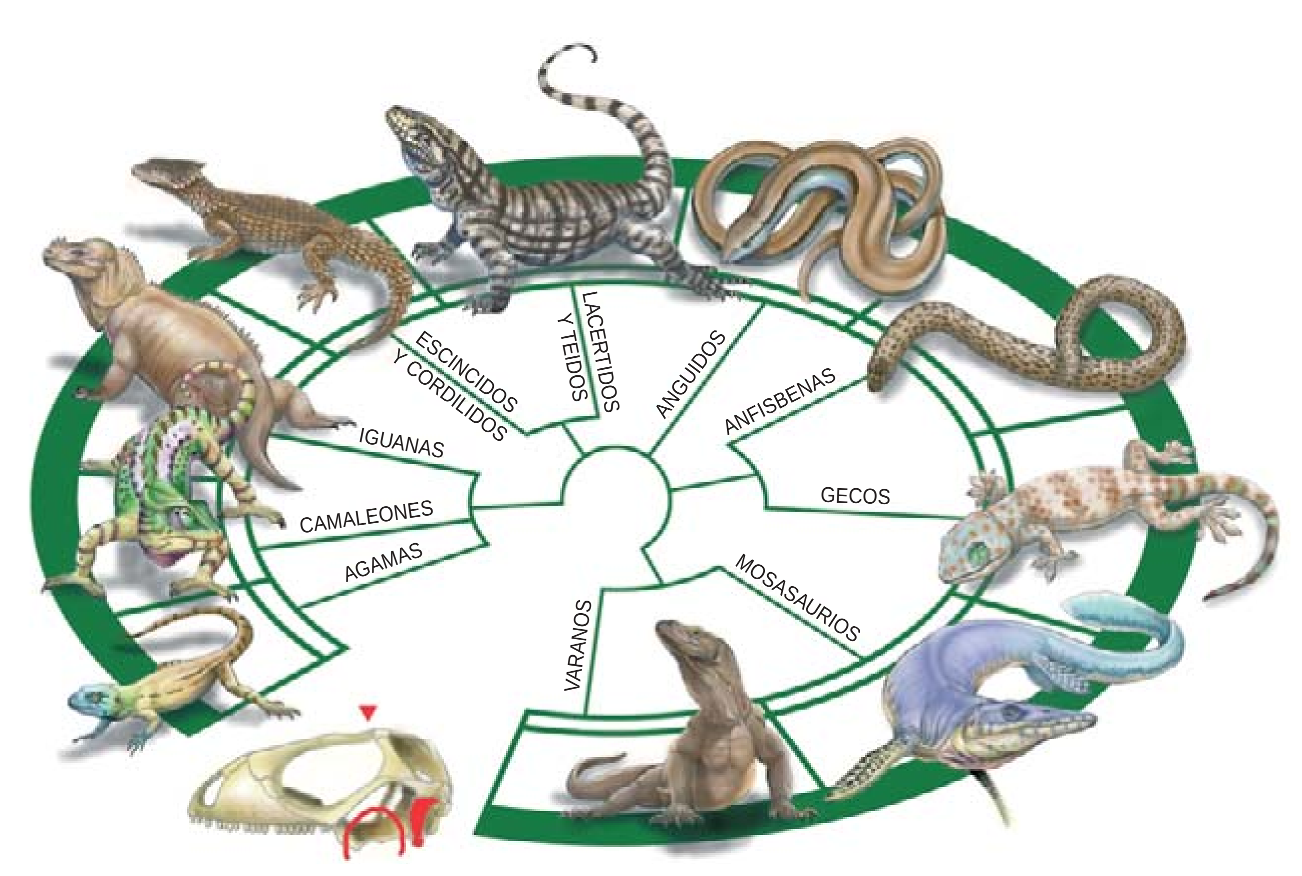
Ente los lacertoideos están el fósil *Pachygenys*, los lacértidos y los xantúsidos. Los lacértidos son lagartos entre pequeños y medianos, diurnos, del Viejo Mundo. Sus fósiles incluyen diversas formas del Terciario Medio de Europa Central. Responden al estereotipo de lagarto, con una cabeza cónica y cuerpo robusto. Presentan escamas, grandes en la cabeza y en la región ventral, y pequeñas en el dorso. Los xantúsidos son pequeños, nocturnos y vivíparos, de pupilas verticales. Habitan en desiertos o selvas, pero siempre huyen de la luz. Insectívoros. Algunas especies son partenogenéticas.

Los lagartos teioideos medran en toda América. Carnívoros. En el Cretácico Tardío de Asia proliferaron mongolochamópidos y adamisáuridos, hoy teioideos fósiles. La principal familia es la de los teidos, cuyo registro se inicia en el Aptiano de Norteamérica (unos 120 millones de años atrás), cuando alcanzaron mayor diversidad e incluían *Harmodontosaurus*, chamopsinos y poliglifanodontinos, con dientes de cúspides múltiples. Durante el Cretácico Superior han tenido una importante radiación asiática que incluye a *Sacognathus* y los gilmoreteidos. Hacia fines del Cretácico el grupo sufrió un fuerte declive; en el Terciario recuperaron su importancia sólo en Sudamérica, con nueve géneros vivos distribuidos entre los tupinambinos y los teiínos.

Lagartos anguimorfos

Entre los anguimorfos se cuentan los escamados emparentados con los ánguidos o "viboritas de cristal" y los cercanos a los varanos o monitores, como los grandes mosasaurios marinos del Cretácico. Su presencia en el registro fósil es notable: se los ha documentado en el Jurásico Medio y en el Jurásico Superior. Se han encontrado numerosos anguimorfos, en especial los primitivos dorsetisáuridos, parte de la primera radiación del grupo, en el Cretácico Inferior (dorsetisáuridos, xenosáuridos, necrosáuridos). Para fines del Cretácico los anguimorfos se hallaban ya divididos en sus grupos principales. Excepto los necrosáuridos y los mosasauroideos, todos los grandes grupos de anguimorfos están representados hoy, incluyendo a los anguioideos y varanoideos.

Los anguioideos son un grupo heterogéneo de lagartos, algunos ápodos (los ánguidos o 'viboritas de cristal'), otros terrestres (xenosáuridos) y otros acuáticos (shinisáuridos). Los más primitivos que se conocen son los dorsetisáuridos, extintos, del Jurásico y Cretácico de Laurasia. Entre los anguioideos vivos, los ánguidos presentan bajo la piel escudos óseos, u osteodermos, rectangulares, excepto a los costados, donde poseen un



10. **LOS ESCAMADOS** han dominado las faunas de reptiles pequeños y medianos del hemisferio norte desde el Jurásico. En el hemisferio sur escasearon hasta fines del Cretácico. Las serpientes son también escamados y deberían aparecer representadas aquí, pero sus relaciones de parentesco están aún sujetas a debate. Sobre un cráneo de escamado se han marcado en rojo algunas de sus características, como la ausencia de la barra temporal inferior, el hueso de articulación mandibular (*cuadrado*) colgante y la articulación laxa en el techo del cráneo.

JORGE A. GONZALEZ; DISEÑO DE MARIANO SANSIBIERI

pliegue de piel. La tendencia a la pérdida de los miembros ya se ve en los ánguidos más primitivos, los gerronotinos y los diploglosinos, y está plenamente desarrollada en las formas carnívoras *Ophisaurus*, *Anguis* y *Anniella*. Los xenosáuridos, diurnos y vivíparos, sólo han sobrevivido en Centroamérica. Los shinisáuridos, semiacuáticos, se alimentan de peces y renacuajos. Representan un grupo basal de anguioideos. Tanto los xenosáuridos como los shinisáuridos poseen un techo craneano fuerte y rugoso porque los osteodermos se han fusionado con el cráneo.

Entre los varanoideos se inscriben lagartos carnívoros de probable origen laurásico. Abundantes en el Cretácico Tardío. Por su facilidad para la natación y el acercamiento de ciertas masas continentales durante el Terciario, algunos invadieron Africa y Australia, regiones de la vieja Gondwana. Los dientes recurvados y con finas puntas de sierra en el filo posterior que presentan los varanoideos hablan de sus hábitos carnívoros.

Se distinguen cuatro grupos: los necrosáuridos, lantanótidos, varánidos y monstersaurios. Los necrosáuridos comprenden lagartos fósiles que habitaron Europa, Norteamérica y Asia entre el Cretácico Superior y el Oligoceno. Incluye los géneros *Necrosaurus* y *Parviderma*. Los lantanótidos son lagartos semiacuáticos de Indonesia, de cuerpo alongado, miembros cortos, ojos pequeños y oídos atrofiados. Son ante todo nocturnos y ovíparos.

Los varánidos, de dieta preferentemente carnívora, alcanzan un tamaño notable en el varano de Komodo, que supera los tres metros. El extinto *Megalania* medía seis. En cambio, el varano pigmeo (*Varanus brevicauda*) ronda apenas los 20 cm. Los varánidos tienen pequeñas cabezas y largos cuellos, así como una cola poderosa que les ha permitido sortear grandes barreras acuáticas. Habitan hoy ambientes del Viejo Mundo muy dispares, de las selvas a los desiertos. El combate ritual bípedo de los machos precede al cortejo. Ponen en nidos preparados.

Los monstersaurios abarcan numerosos fósiles del Cretácico y los actuales helodermátidos, unos lagartos venenosos de Centroamérica y las regiones desiertas del sur de Norteamérica, entre ellos el llamado “monstruo de Gila”. Reptiles pesados y cubiertos de osteodermos, poseen una cola gruesa y corta, donde almacenan sustancias grasas. Carnívoros, diurnos y solitarios.

Los mosasauroideos comprenden a los mosasáuridos y eguialosáuridos (Aigialosauridae). Lagartos marinos extintos de cráneo mesocinético y tamaño mediano a grande; algunos llegan a los diez metros de longitud. Sus miembros han desarrollado amplias paletas natatorias. Sus dientes, acanalados y de robustas bases, han dejado marcas en las corazas de muchos amonites. Los eguialosaurios los preceden temporalmente: hay noticia de ellos desde el Jurásico Superior de Europa; el registro fósil de los mosasaurios se restringe al Cretácico

Superior y su extinción parece hallarse ligada a la de los dinosaurios al final del Cretácico.

Gecos: caminar por las paredes

Los miembros del grupo Gekkota, o gecos, son lagartos entre pequeños (3 cm) y grandes (60 cm), mayormente ovíparos, con distribución global, incluidos desiertos y selvas. Se alimentan de insectos y pequeños vertebrados, presentan reducciones importantes en los huesos craneanos, ojos grandes de pupilas verticales en los de hábitos nocturnos o redondas en los escasos diurnos, con párpados móviles o no, y una lengua bifurcada o simple. Las variedades arborícolas exhiben un depurado sistema de múltiples láminas en los extremos de los dedos que les permiten caminar sin riesgo por superficies verticales lisas. Estas adaptaciones faltan en las especies más terrestres. Sus colas funcionan como órganos de reserva. Poseen una coloración críptica o llamativa. Presentan además una amplia diversidad de escamas.

El registro más antiguo de un geco es el del *Hoburogecko*, del Cretácico Temprano de Mongolia (120 millones de años). En un principio se tomó al escamado primitivo *Eichstaettisaurus*, del Jurásico Superior de Solnhoffen, por un geco, pero hace poco se refutó esa adscripción.

Anfisbenas y dibámidos, misterios subterráneos

Las anfisbenas, los vulgares “lagartos-gusano” o “víboras de dos cabezas”, son reptiles ápodos de tamaño mediano que viven en los sistemas de túneles que abren. El género *Bipes* ha conservado los brazos. En general, las anfisbenas han reducido su pulmón derecho y sus ojos. Presentan cráneos muy consolidados, con los que excavan la tierra, y grandes dientes con los que cazan lombrices. Su cola es corta y el tronco largo. Se distribuyen por Africa y Sudamérica, con algunas especies en Europa y Norteamérica. El registro fósil se conserva en sedimentos desde el Terciario Temprano de Europa y Norteamérica. Algunos fragmentos de mandíbulas se han hallado también en rocas del Cretácico Inferior de Uzbekistán y Mongolia.

Los dibámidos, lagartos ápodos y excavadores, se distinguen por la reducción de sus miembros posteriores, oídos atrofiados y ojos cubiertos por una placa. Viven en México e Indonesia. No se les conocen fósiles. Se ha pensado que tanto los dibámidos como las anfisbenas estuvieron cercanos al origen de las serpientes. Estas constituyen, en lo esencial, un grupo de lagartos sin patas. En ellas, la reducción de miembros es extrema y su dispersión por todos los continentes, excepto las zonas muy frías, nos habla de una notable plasticidad evolutiva y, sin duda, de un modelo corporal muy exitoso, que perdura a través de océanos de tiempo.

Plasticidad de los lepidosaurios

Los lepidosaurios han mostrado una plasticidad evolutiva notable. Según el linaje, planean para cazar insectos; nadan en busca de peces o algas; corren a cuatro patas, a dos o carecen de ellas; habitan en islas barridas por fríos vientos, en desiertos calcinantes, sobre los árboles de la selva o en el mundo subterráneo; se alimentan de plantas, insectos u otros vertebrados; desarrollan complejos comportamientos para atraer a su pareja o se reproducen por partenogénesis; ponen huevos o paren a sus crías vivas; almacenan reservas; degluten presas más voluminosas que ellos mismos; generan venenos; trepan por donde sólo un insecto puede; nadan donde sólo un pez o un cetáceo llega; exhiben colores apagados para mimetizarse con el entorno o los colores más brillantes para atraerse una pareja; cazan a dentelladas o disparan la lengua; asustan al agresor, presentan batalla o dejan media cola de recuerdo; preparan una emboscada de horas o advierten al agresor con sonidos; y lo mismo son microvertebrados con un cráneo de un centímetro que megavertebrados con cráneos de un metro de largo.

Si bien hoy la mayoría de los lepidosaurios posee un tamaño modesto, su número, diversidad e historia evolutiva los convierten en componentes fundamentales de los ecosistemas. Están aquí desde antes que los dinosaurios. Figuran en nuestras leyendas y en nuestros sueños y pesadillas. En nuestras manos está disfrutar de su sorprendente diversidad, entender su evolución y aprender que muchas de sus especies, aun de serpientes, nos resultan inmediatamente útiles. En nuestras manos está respetar sus hábitats o sojuzgarlos hasta reducir su número y diversidad al mínimo.

El autor

Sebastián Apesteguía es paleontólogo del Museo Argentino de Ciencias Naturales, donde trabaja desde 1988, director del Area de Paleontología del CEBBAD (Fundación Félix de Azara-Universidad Maimónides) y titular de la cátedra de Herpetología de la Universidad CAECE. Ha descubierto varias localidades fosilíferas cretácicas, entre las que se halla “La Buitrera”. Es autor de 42 artículos científicos y 4 libros de dinosaurios para jóvenes. Investiga sobre la evolución de los esfenodontes y de los dinosaurios saurópodos.

Bibliografía complementaria

EVOLUCIÓN DE LOS LAGARTOS DEL CARIBE. Jonathan B. Losos en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, págs. 14-20, mayo 2001.

LARGE CRETACEOUS SPHENODONTIAN FROM PATAGONIA PROVIDES INSIGHT INTO LEPIDOSAUR EVOLUTION IN GONDWANA. Sebastián Apesteguía y Fernando E. Novas en *Nature*, vol. 425, págs. 609-612; 2003.

AT THE FEET OF THE DINOSAURS: THE EARLY HISTORY AND RADIATION OF LIZARDS. Susan Evans en *Biological Reviews*, vol. 78, págs. 513-551; 2004.

AN EARLY LATE CRETACEOUS LIZARD FROM PATAGONIA, ARGENTINA. Sebastián Apesteguía, Federico L. Agnolín y Gabriel Lio en *Comptes Rendus Palevol*, vol. 4, n.º 4, págs. 311-315; 2005.

Las expediciones a La Buitrera fueron financiadas por The Jurassic Foundation, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (Argentina), la National Geographic Society, PaleoGénesis y el Rotary Club.

Curcumina, ¿una especia sanadora?

Gary Stix

La búsqueda de nuevos fármacos, ya esté basada en la rebusca por la farmacopea popular o en la recolección de plantas silvestres, tiene una historia profusa en claroscuros. Son muchos los compuestos de probado valor terapéutico que tuvieron su origen en árboles, matorrales, moluscos e incluso en el lodo. La aspirina procede de la corteza del sauce; las estatinas, que se utilizan para rebajar el colesterol, de un moho; la artemisina, agente antimalárico, de un matojo utilizado en la medicina tradicional china.

Pero no todo son luces. La compañía Shaman Pharmaceuticals, que logró reunir 90 millones de dólares en el decenio finisecular tras una campaña muy publicitada, concebida para hallar nuevos fármacos a partir de los conocimientos indígenas, tuvo que apuntar más bajo y dedicarse exclusivamente a vender sus productos como suplementos dietéticos. Al final, se vio obligada a cerrar sus puertas para siempre hace pocos años.

Puede que la tendencia vaya ahora a cobrar un nuevo giro. Desde hace algunos años, varios compuestos naturales (el resveratrol del vino tinto, los ácidos grasos omega-3 que contienen los aceites de pescado, etcétera) han empezado a ser objeto de un escrutinio estricto. Ello se debe a que las investigaciones

LA CURCUMA o batatilla (*Curcuma longa*) produce rizomas, brotes tuberosos subterráneos, de los que se obtiene la especia del mismo nombre.

DANIELA NAOMI MOLNAR

preliminares sugieren que esas sustancias podrían servir para el tratamiento o la prevención de enfermedades, a bajo coste y con escasos efectos secundarios.

A esa lista ha venido a sumarse la cúrcuma (llamada también batatilla o tumérico), un polvo amarillo-anaranjado que se obtiene de la planta asiática *Curcuma longa*. Este colorante culinario ha dejado de ser un mero ingrediente para especiar *vindaloos* y *tandooris*, que se venía utilizando desde tiempos remotos para aromatizar y conservar alimentos.

Un libro de próxima publicación dedica uno de sus capítulos a los componentes biológicamente activos de la cúrcuma: la curcumina y otros compuestos afines, los curcuminoides. Poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antivíricas, antibacterianas y antifúngicas; además, presentan actividad potencial contra el cáncer, la diabetes, la artritis, la enfermedad de Alzheimer y otras patologías crónicas. En 2005, unos 300 artículos científicos y técnicos de la base de datos PubMed de la Biblioteca Nacional de Medicina estadounidense hacían referencia a la curcumina, frente al centenar de sólo cinco años antes.

Varios expertos se han sentido atraídos por este compuesto debido a sus numerosos posibles efectos valiosos sobre nuestro organismo y su, al parecer, escasa toxicidad. Están estudiando la forma en que esta especia, o sus derivados, podría utilizarse no sólo como principio medicamentoso, sino también como elemento preventivo de bajo coste contra algunos de los trastornos más temibles. Posee propiedades terapéuticas atractivas. Dado que la curcumina opera sobre tantas sendas biológicas, resultaría útil en el tratamiento del cáncer: las células tumorales pueden tardar en desarrollar resistencia al compuesto y, por tanto, deberían sufrir más de una mutación para eludir las diversas vías de ataque de la sustancia.

Un ingrediente del curry pudiera ser de ayuda en el mal de Alzheimer, el cáncer y otras enfermedades

Pero, ¿puede hacerse un uso generalizado de este compuesto? Algunos trabajos ofrecen razones para la cautela. Entre las más de 1700 referencias a la curcumina que aparecen en PubMed se cuentan estudios que hacen ver que los compuestos que, como éste, operan en tantas rutas biológicas, pulsan a veces un botón indebido y en vez de inhibir la enfermedad, contribuyen al progreso de la misma.

“Historial médico”

La cúrcuma (*haldi* en idioma hindi, *juang huang* en chino, o *manjal* en tamil) posee un historial en medicina que se remonta 5000 años. En aquellos tiempos constituía un medicamento esencial para la curación de heridas, la depuración de la sangre y el tratamiento de las enfermedades del estómago en la medicina ayurvédica de la India.

El primer registro de investigación de la actividad biológica de la curcumina que figura en PubMed data de 1970: un grupo de investigadores indios informaron de los efectos de este compuesto sobre el nivel de colesterol en ratas. Los estudios aceleraron el paso en los años noventa. Uno de los expertos era Bharat Aggarwal, ex científico de Genentech, quien antes de prestar atención a la curcumina había tomado otras sendas en busca de un tratamiento contra el cáncer. Aquel trabajo le llevó, tras un largo rodeo, hasta el compuesto que aquí nos ocupa.

Hace unos 20 años, Aggarwal y su equipo de Genentech purificaron dos importantes moléculas del sistema inmunitario: los factores de necrosis tumoral (FNT) alfa y beta, posibles principios activos contra el cáncer. Si se aplican en áreas bien definidas, estas moléculas matan células cancerosas. Cuando circulan libremente por el torrente sanguíneo, en cambio, se convierten en poderosos agentes tumorigénicos. Los FNT activan el factor nuclear kappa B (FN kappa B), una proteína que activa a su vez una pléyade de genes que intervienen en procesos inflamatorios y en la proliferación celular.

Este nexo entre la inflamación y la proliferación incontrolada de células cancerosas indujo a Aggarwal a retornar a sus raíces. En 1989, se trasladó al centro oncológico M. D. Anderson de la Universidad de Texas. Empezó a buscar compuestos que impidieran la inflamación y poseyeran efectos anticancerosos. Al recordar de su juventud en la India que la cúrcuma era para la medicina ayurvédica un antiinflamatorio, decidió darle una oportunidad a esa especia. “Fuimos a la cocina y cogimos una pizca”, rememora Aggarwal. “No podíamos creerlo: bloqueaba por completo los FNT y la FN kappa B.”

Los estudios de Aggarwal muestran que, si se bloquea con curcumina la ruta biológica de la FN kappa B, se inhibe la replicación y proliferación de varios tipos de células cancerosas. Estos resultados han servido de trampolín para ensayos clínicos provisionales, a pequeña escala, en el centro M. D. Anderson, en los que se ha utilizado curcumina como terapia coadyuvante en el tratamiento del cáncer de páncreas y del mieloma múltiple. Se están iniciando ensayos —posiblemente ya en curso en otros centros— orientados a la prevención del cáncer de colon y de la enfermedad de Alzheimer, entre otros trastornos. Los primeros trabajos, basados en cultivos celulares o en estudios sobre modelos animales, han permitido comprobar que la curcumina puede actuar contra un amplio abanico de enfermedades inflamatorias: la pancreatitis, la artritis, la inflamación intestinal, la colitis, la gastritis, ciertas alergias y la fiebre, entre otras. La curcumina ofrece cierta promesa en el tratamiento de la diabetes y enfermedades autoinmunitarias o cardiovasculares.

Todavía están por realizar los estudios clínicos a gran escala que demuestren la eficacia de la curcumina contra el cáncer y otras enfermedades. No obstante, Aggarwal se ha convertido en ardiente paladín de una especia que fue traída a Europa por Vasco da Gama, de regreso de sus viajes a Oriente. El capítulo de Aggarwal en un nuevo libro de texto del que es coeditor se titula: “Curcumina: el oro macizo de la India.”

El centro oncológico M. D. Anderson ha comenzado a promover el uso de la curcumina en mayor medida de lo que sería de esperar para un tratamiento que no se ha sometido todavía a los ensayos clínicos protocolarios. La sección de "preguntas frecuentes" de su sede en la Red recomienda la adquisición de curcumina en un mayorista concreto, para quien Aggarwal había trabajado (cobraba por promocionar sus productos). La compañía llegó a emitir un comunicado de prensa en el que manifestaba que su producto era un "ingrediente de elección" de M. D. Anderson.

Asimismo, el centro sugiere que los enfermos de cáncer vayan aumentando de forma gradual las tomas, hasta llegar a una dosis diaria de 8 gramos, unas 40 veces superior a la cantidad consumida en la dieta media india. Sin embargo, la mayoría de los fármacos se administran en dosis medidas en miligramos. La página de la Red incluso afirma: "Es de esperar una notable mejoría al cabo de ocho semanas". Al preguntarle si no temía que con dosis de ocho gramos diarios pudieran presentarse efectos secundarios indeseables, Aggarwal respondió que en ensayos clínicos a pequeña escala realizados en otras instituciones se habían suministrado dosis de hasta 12 gramos; daba por supuesto que, de haberse presentado algún efecto adverso con la dosificación recomendada por M. D. Anderson, los pacientes se lo habrían notificado. Aggarwal, que ingiere a diario una píldora de curcumina, rechaza las cautelas que suelen mostrar los investigadores antes de que se hayan llevado a cabo estudios clínicos controlados y a gran escala.

¿Cancerígena?

El sitio de la Red de M. D. Anderson y la riada de comunicados de prensa de diversas instituciones loando las maravillas de la curcumina hacen caso omiso de una pequeña parte de la bibliografía científica que señala un lado oscuro: la posibilidad de que esta especia coadyuve en ocasiones a la supervivencia de células cancerosas. Yosef Shaul, del departamento de genética molecular del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, ha estudiado NQO1, la enzima que regula la cantidad de proteína p53. Cuando la concentración celular de p53 aumenta, se instaura una maniobra defensiva para el organismo: las células cancerosas o lesionadas dejan de dividirse o se suicidan.

Shaul y sus compañeros habían hallado que el anticoagulante dicoumarol y otros compuestos afines bloqueaban la NQO1, lo que se oponía a la función de p53. Se preguntaron qué ocurriría si expusieran la p53 de células normales y de células de leucemia mieloide a compuestos antioxidantes como la curcumina o el resveratrol. Para sorpresa suya, la curcumina, al inhibir la misma enzima, impedía que p53 enviase al patíbulo a las células aberrantes. Otros investigadores han publicado resultados semejantes.

Aggarwal responde a este conjunto de trabajos señalando estudios que indican lo contrario: a saber, que la curcumina produce la activación de p53.

Los investigadores clínicos tendrán que averiguar ahora si los trabajos de Shaul sobre cultivos celulares guardan relación con lo que ocurre cuando una persona ingiere el compuesto. Las concentraciones de curcumina utilizadas por el equipo del Weizmann en cultivos celulares —de 10 a 60 micromolar— son equivalentes a las concentraciones alcanzadas en algunos de los experimentos *in vitro* efectuados en M. D. Anderson.

Sin embargo, dado que la curcumina es mal absorbida por la pared intestinal, llega con dificultad al torrente circulatorio y, además, se descompone con prontitud en nuestro organismo: un sujeto que ingiera 8 gramos diarios acabaría con una concentración en su plasma sanguíneo no mayor de 2,0 micromolar. Este valor podría ser superior en el tracto gastrointestinal y en el hígado; se mantendría elevado también, si se desarrollasen

Estudios recientes indican posibles beneficios de la curcumina...

ENFERMEDAD	HALLAZGOS	INSTITUCION	PUBLICACION
Artritis reumatoide	Un extracto de raíz de cúrcuma inhibió la inflamación y destrucción de las articulaciones en ratas	Facultad de Medicina de la Universidad de Arizona	*Arthritis and Rheumatism*, noviembre de 2006
Enfermedad de Alzheimer	En estudios *in vitro*, la curcumina contribuyó a que células del sistema inmunitario degradasen componentes de las placas de Alzheimer	Universidad de California en Los Angeles y la Administración de Veteranos	*Journal of Alzheimer's Disease*, 9 de octubre de 2006
Cáncer de colon	En cultivos celulares, la curcumina bloqueó la actividad de una hormona vinculada al desarrollo del cáncer de colon	Sección de Medicina de la Universidad de Texas en Galveston	*Clinical Cancer Research*, 15 de septiembre de 2006
Pólipos colorrectales	Una combinación de curcumina y de un fitocompuesto, la quercetina, redujo el número y el tamaño de lesiones precancerosas en cinco pacientes	Universidad Johns Hopkins y Clínica de Cleveland	*Clinical Gastroenterology and Hepatology*, agosto de 2006
Minusvalías cognitivas	En Singapur, más de 1000 personas de edad avanzada que informaron de haber tomado curry al menos de forma ocasional obtuvieron mejores puntuaciones en un test de cognición que quienes raramente o nunca tomaban ese condimento. El efecto podría atribuirse a la curcumina	Universidad Nacional de Singapur y otras instituciones	*American Journal of Epidemiology*, 1 de noviembre de 2006

...Pero ciertas investigaciones sugieren posibles efectos cancerígenos

ENFERMEDAD	HALLAZGOS	INSTITUCION	PUBLICACION
Leucemia mieloide	La curcumina, aplicada en grandes dosis en un cultivo celular, espolea la degradación de la proteína p53, que impide la replicación de las células cancerosas o induce su muerte	Instituto Weizmann de Ciencia en Rehovot	*Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 12 de abril de 2005
Cáncer de colon	La curcumina inactiva el supresor tumoral de p53 en las células de cáncer de colon	Universidad de Utah	*Carcinogénesis*, septiembre de 2004
Cáncer de mama	La curcumina inhibe en diversos fármacos quimioterapéuticos su capacidad de inducir la muerte celular, en cultivos y en modelos animales	Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill	*Cancer Research*, 1 de julio de 2002



FoodPix

métodos para aumentar la concentración de curcumina en la sangre.

La información que M. D. Anderson expone en su sitio en la Red puede dar la impresión de que la dosis de 8 gramos diarios ofrece garantías. Pero la reducida presencia de curcumina en la sangre —que debería elevarse si la sustancia combatiera realmente la enfermedad— constituye un problema que continuará incordiando a quienes la investigan. Los estudios con animales que se mencionan en prueba de potenciales beneficios de la curcumina, han utilizado, por lo general, dosis inferiores a las equivalentes a 8 gramos diarios en humanos; las concentraciones en sangre no se han movido de la banda nanomolar. El propio Shaul se sorprende de que concentraciones tan moderadas de curcumina resulten beneficiosas en los animales ensayados.

En todo fármaco, la dosificación reviste una importancia crucial: cualquier agente terapéutico, incluso la aspirina, resulta tóxico a dosis elevadas. La dosis óptima para un fármaco nuevo, la que alcanza la concentración plasmática deseada, suele determinarse mediante rondas sucesivas de ensayos preclínicos en cultivos celulares y en ratones. Pero las compañías farmacéuticas no muestran mucho interés en realizar estos ensayos con la curcumina. Prefieren invertir en terapias para dianas claramente definidas: una sustancia que opere sobre un receptor concreto quizá trate la enfermedad al tiempo que reduce los efectos secundarios indeseados; un fármaco de acción múltiple, en cambio, aumentaría la probabilidad de efectos adversos. Otra cuestión, no menos importante, es el delicado problema de obtención de patentes para medicinas de uso popular tradicional.

La cúrcuma ha dado pie a uno de los mayores litigios entre la propiedad intelectual y la biopiratería. Una organización investigadora financiada por el gobierno de la India se enfrentó a la Universidad de Mississippi por una patente que en 1995 se concedió a esa entidad sobre la especia, como cicatrizante de heridas. La oficina de patentes y marcas registradas de EE.UU. revocó la patente después de que el Consejo Indio de Investigación Científica e Industrial objetase que no se había cumplido uno de los criterios para la concesión de patentes: a saber, que se tratase de un invento nuevo. El Consejo sustentó su objeción en un artículo de una revista india, publicado en 1953, que se ocupaba de la especia; presentó también una cita de las propiedades cicatrizantes de la cúrcuma tomada de un antiguo texto sánscrito.

Se han otorgado posteriormente patentes para usos específicos de la curcumina como compuesto aislado. Pero la revocación entraña que las compañías farmacéuticas no podrán obtener nunca una patente de "producto" para la cúrcuma que les dé una cobertura mayor, lo que disuadiría a la competencia de buscar fármacos basados en la especia. Una cuantas compañías de poco fuste están tratando todavía de explotar las posibilidades de esta sustancia. Mediante la modificación de su composición química, se proponen potenciar su actividad, al tiempo que, al crear un compuesto nuevo, facilitan la protección de la propiedad intelectual correspondiente.

AndroScience, una empresa de San Diego, proyecta iniciar este año la primera fase de ensayos clínicos con un fármaco contra el acné. Se basa en compuestos derivados de la curcumina, descubiertos en colaboración con la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Curry Pharmaceuticals, de Research Triangle Park, se propone recabar financiación para someter a ensayos clínicos ciertos

derivados de la curcumina, obtenidos en la Universidad de Emory.

Pero en una era de fármacos monodiana, los inversionistas de capital-riesgo, recelosos ante posibles efectos secundarios, no se prestan fácilmente a respaldar fármacos nuevos que operen sobre varias rutas biológicas. Aggarwal, por su parte, aunque es cofundador de Curry Pharmaceuticals y posee patentes sobre la curcumina, afirma que los químicos pueden encontrar dificultades para mejorar lo que ha hecho la naturaleza; en su opinión, la modificación de la curcumina quizá sirva sólo para provocar efectos secundarios en los pacientes.

Si se supera la multitud de obstáculos que dificultan el desarrollo farmacológico y se garantiza la seguridad, la curcumina podría constituir una alternativa de bajo coste a los medicamentos de gran curso. Greg Cole, de la Universidad de California en Los Angeles y de la Administración de Veteranos, apoyándose en resultados positivos en roedores, está organizando un ensayo clínico en humanos para verificar si la curcumina impide la formación de las placas amiloides, que tan pesada losa suponen para las víctimas del Alzheimer. De tener éxito, Cole y su colaboradora Sally Frautschy intentarían conseguir preparaciones que sean miscibles con el aceite de cocina (para reforzar su biodisponibilidad) y que puedan ingerirse con los alimentos, con el fin de impedir la acumulación de placas: una receta que podría estar al alcance de ricos y pobres en un mundo que envejece.

Bibliografía complementaria

INHIBITION DE NAD(P)H: QUINONE OXIDOREDUCTASE 1 ACTIVITY AND INDUCTION OF P53 DEGRADATION BY THE NATURAL PHENOLIC COMPOUND CURCUMIN. Peter Tsvetckov et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 102, págs. 5535-5540; 12 de abril, 2005.

MULTIPLE BIOLOGICAL ACTIVITIES OF CURCUMIN: A SHORT REVIEW. Radha K. Maheswari et al. en *Life Sciences*, vol. 78, págs. 2081-2087; 2006.

THE MOLECULAR TARGETS AND THERAPEUTIC USES OF CURCUMIN IN HEALTH AND DISEASE. Compilación de Bharat B. Aggarwal, Young-Joon Surh y Shishir Shishodia. Springer, 2007.

Los ancestros de los vikingos

La pacífica sociedad germánica del norte de Europa se fue militarizando progresivamente hasta dar lugar a la explosión vikinga del siglo IX y los primeros reinos escandinavos

Michel Kazanski

Junio del año 793. En el monasterio de Lindisfarne, isla al norte de Inglaterra, un monje divisa un barco extraño. ¿Serán mercaderes o peregrinos? Los pacíficos religiosos se lo están preguntando todavía cuando de la nave desembarcan unos guerreros que los masacran, saquean e incendian el monasterio. Este sacrilegio horroriza a todo Occidente: se ha osado atacar a una de las instituciones cristianas más venerables. La conmoción que ello produce marca el comienzo de la era vikinga: de Inglaterra a España, de Gibraltar al mar Caspio, Europa entera sufre los asaltos de estos "bárbaros" surgidos de las brumas del norte, es decir, de ninguna parte conocida. Fórjase entonces, y persistirá hasta hoy, su imagen de guerreros paganos, salvajes y sanguinarios.

Mas los vikingos no aparecen de repente ni proceden de ningún sitio. La Europa de la que forman parte los conoce desde hace mucho tiempo. Son el producto de una larga tradición germánica cuyas raíces se remontan por lo menos ocho siglos antes del cruel ataque de Lindisfarne. Aquí vamos a presentar el origen y la evolución de aquellos "antepasados de los vikingos", de aquellos oscuros bárbaros nórdicos de las épocas romana y medieval, basándonos en la arqueología escandinava. Su caso es interesante, pues representan un ejemplo tardío, bien documentado, de la transformación de la primitiva sociedad rural europea en una sociedad cada vez más dominada por los guerreros y después por los nobles, antes de que emergieran los reinos precursores de las primeras formas de estado escandinavas.

Los ancestros de los vikingos son los germanos del norte. Pero, ¿qué se entiende por "germanos"? Los pueblos germánicos entran en la historia en el año 113 antes de nuestra era, cuando la brusca migración de dos pueblos



A partir de ahí, en pleno Océano, se imponen los suiones por sus guerreros y sus armas, pero sobre todo por sus naves. Dan a éstas una forma que difiere de la nuestra en que tienen proa por los dos extremos, de modo que siempre puedan atacar de frente; no usan velas, ni ponen hileras de remos en los costados, sino que se valen, como en ciertos casos de navegación fluvial, de remeros que se desplazan de un lado al otro según lo requiera la situación.
Tácito, Germania, XLIV.



1. LOS GERMANOS DEL NORTE eran excelentes artistas. Un “bracteado” (*foto lateral*), es decir, una imitación de un medallón romano, hallado en Skåne, en Suecia, y un torque (collar rígido) de oro hallado en Tureholm, en el mismo país, ilustran su habilidad. Esta destreza metalúrgica y la abundancia de hierro en Suecia resultaron determinantes en la progresiva militarización de las sociedades germánicas del norte. Tal proceso culminará en la formación de los primeros reinos escandinavos y en la explosión vikinga del siglo IX. Los imponentes túmulos funerarios de los primeros reyes suecos (*arriba a la izquierda*) y el fuerte de Eketorp (*vista aérea*, *arriba a la derecha*) en la isla de Oland (Suecia) testimonian esta militarización.

MICHEL KAZANSKI/*Pour la Science*

—los cimbrios y los teutones— sacude a Europa. Ahora bien, el carácter germánico de un pueblo de esta época es cuestión convencional. La arqueología y la lingüística muestran, efectivamente, que en la Antigüedad resulta muy imprecisa, incluso imaginaria, la frontera cultural entre germanos y celtas. César es el primero que, en pos de promover su gloria, hace del Rhin una frontera entre galos y germanos. Sin embargo, lo que sucede al otro lado del río es bastante mal conocido por los romanos. La cita de Tácito (50-120) que reproducimos aquí atestigua, con todo, que conocían a los suiones, antepasados de los actuales suecos.

Los germanos antiguos

¿Qué sabemos de los antiguos germanos? Su rastro más evidente es el lingüístico. Se distinguen tres tipos de lenguas germánicas antiguas: la germánica occidental, la germánica oriental y la de los germanos del norte. Los que hablaban estas antiguas lenguas germánicas vivían en una vasta región que iba desde el Rhin hasta el Vístula (en Polonia), región a la que se ha convenido en llamar la “cuna germánica”. Los germanos occidentales habitaban a orillas del Rhin; los germanos orientales ocupaban la cuenca del Vístula; los germanos del norte vivían en el noroeste de Europa, en concreto en Jutlandia, la parte continental de Dinamarca. Por consiguiente, las actuales Suecia y Noruega no formaban parte de la “cuna germánica”. La población original de estos países, emparentada con los fineses, fue sin duda expulsada hacia el norte por los germanos en la época medieval. Sus descendientes son los sami (lapones), que aún viven en



2. LA CUNA GERMANICA, región que habitaron los germanos durante la Antigüedad, se extendía desde el Rhin hasta el Vístula. Resulta difícil definir sus límites, porque a los germanos no se les distinguía bien de sus vecinos los celtas. Los vikingos descienden de los antiguos germanos del norte, que vivían en la parte danesa de Escandinavia y en el norte de Alemania. Ya antes de nuestra era, los germanos del norte hacían sacrificios a sus dioses arrojando a un lago sagrado bienes valiosos, sobre todo armas. En los primeros siglos de nuestra era, las sociedades germánicas del norte se vuelven más belicosas —lo que se manifiesta por la multiplicación de ofrendas de armas en los lagos (*puntos negros y rojos*)— y se extienden hacia el norte. A partir del siglo III, Jutlandia, principal territorio de origen de los germanos del norte, es atacada por ejércitos procedentes del sur de Noruega, de Suecia o del norte de Alemania. Así, varios yacimientos de ofrendas de armas utilizados a finales del siglo IV (*puntos rojos*) se acreditan como escenario de un ataque sueco por aquella época. Uno de estos yacimientos, Illerup, es de una riqueza impresionante. Aquí abajo: (*a*) montón de armas recién descubierto; (*b*) umbón —protuberancia central— de un escudo ricamente ornamentado, destruido antes de servir de ofrenda; (*c*) empuñadura de una espada.

el norte de Escandinavia (la parte de Europa constituida por Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia).

Dentro de la cuna germánica (*véase la figura 2*), los antiguos germanos vivían en pequeñas comunidades rurales aisladas o agrupadas en villorrios. Los arqueólogos alemanes han distinguido algunas ligas cultuales entre estas comunidades, es decir, conjuntos en los que se reverenciaba a las mismas divinidades y se compartía un santuario principal. En el territorio danés de hoy, por ejemplo, la liga "de los hijos de Nerthus" tenía su santuario central en la isla de Fionia o en la de Seeland. El carro de la diosa se conservaba allí en un bosque sagrado, del que sólo salía durante las festividades, llevado en procesión por unas becerras y cubierto con paños para ocultar a la divinidad. "Carro, paños y, si se quiere creerlo, la diosa misma son bañados en un lago remoto. Realizan tal tarea esclavos a los que después se ahoga en esas aguas", cuenta Tácito. La costumbre de los germanos de celebrar sacrificios en un lago sagrado persistió mientras siguieron siendo paganos.

Sacrificios arcaicos

Aquella primitiva sociedad germánica era probablemente muy igualitaria. ¿Cuándo empezó a transformarse y, sobre todo, a estratificarse en clases sociales? Las primeras tumbas de privilegiados, único indicio del que disponemos, aparecen entre los siglos I y II de nuestra era. Contienen valiosos objetos metálicos; por ejemplo, piezas de vajilla romana de bronce o de plata. Se distinguen por los ritos de inhumación. Mientras al nórdico común se le incinera, ciertos miembros eminentes de la comunidad se hacen enterrar en cámaras funerarias. ¿De quiénes se trata? ¿Jefes de clan? ¿Sacerdotes? No lo sabemos, pero sus sepulturas son numerosas en toda la parte escandinava de la cuna germánica. Son, en cambio, muy raras más al norte, lo cual confirma que las actuales Noruega y Suecia no formaron parte de esa cuna.

En el siglo III d.C. es perceptible una masiva militarización de las sociedades germánicas del norte. Rápida evolución social que se evidencia ante todo por un general empobrecimiento de las tumbas de jefes pertenecientes a esta época, numerosas en Dinamarca y siempre raras

MICHEL KAZANSKI/*Pour la Science*







más al norte. La importancia adquirida por los guerreros se manifestó a continuación por los sacrificios de armas. Este rito se hallaba muy enraizado entre los germanos del norte, pues Hjortspring (en la isla de Als), el más antiguo yacimiento con ofrenda de armas, data del siglo IV a.C. Se conocen otros yacimientos del comienzo de nuestra era, tales como Vimose, en la isla de Fionia, o Thorsberg, en el norte de Alemania. Pero aumentan sorprendentemente en número e importancia a partir del siglo III. Merecen especial mención Illerup, Vimose y Thorsberg para el período 200-250, y Ejsbøl-Nord, Nydam, Thorsberg, Kragehul, Hassle-Bösarp, Skedemosse y Gudingsåkrarne para comienzos del siglo IV. Hay también yacimientos de finales del siglo IV, de comienzos del V, etcétera.

Un ejército sumergido

Detallemos el más emblemático de estos descubrimientos, testigo de la militarización de los germanos del norte: Illerup. En este valle del este de Jutlandia, con el tiempo se fue colmatando un antiguo lago de unos 100.000 metros cuadrados de extensión. El danés Jorgen Ilkjaer y el alemán Claus von Carnap-Bornheim, que excavaron más de un tercio del mismo, han sacado a la luz unos 15.000 objetos (*véase la figura 2*). Entre las osamentas, los fragmentos de madera y de cerámicas y demás objetos, predomina el equipamiento militar. Los antiguos légamos de Illerup han entregado ya no menos de 1409 lanzas y jabalinas y alrededor de 450 espadas. Aunque todavía queda por excavar gran parte del lago, puede ya afirmarse que la tropa cuyo equipamiento se sacrificó en Illerup a comienzos del siglo III constaba de varios centenares de guerreros. Si se tiene en cuenta lo poco poblado que por entonces estaba el norte de Europa, debió de tratarse de un ejército entero.

Se conoce una decena de sacrificios de la primera mitad del siglo III en la región del estrecho de Kattegat —al este de Jutlandia—, en la isla de Fionia y, en menor medida, en la de Seeland (*véanse las figuras 2 y 3*).

Indiscutiblemente, a comienzos del siglo III se dio en la región una intensa actividad militar, lo que indica que un poder fuerte y centralizado defendía allí un territorio codiciado por un poder concurrente. J. Ilkjaer ha reconstituido la situación militar, en torno al año 200, de la región de Kattegat (*véase la figura 2)*. Según él, la zona fue atacada por ejércitos del sur de Noruega o de Suecia. Muchos objetos que provienen de esas regiones, por ejemplo las flechas de madera de pino descubiertas en Illerup, corroboran tal hipótesis. Los numerosos combates, los ataques continuos y la necesaria planificación táctica y estratégica prueban que en la Europa del norte existieron vastas organizaciones militares y había, por tanto, una compleja estructura social. ¿Cómo, sin un poder fuerte y de amplias ramificaciones, se habría logrado reunir a tantos defensores en una región que no podía mantenerlos?

El extraordinario descubrimiento de Nydam por el arqueólogo danés Conrad Engelhardt en 1863 debe también mencionarse, porque ilustra la riqueza de los guerreros. En este pantano situado en la isla de Als, al sur de Dinamarca, se sacrificaron voluntariamente para complacer a los dioses tres navíos cargados de objetos diversos y de armas (*véase la figura 4)*. La dendrocronología (método de datación basado en el estudio de los anillos de crecimiento de los troncos de los árboles) muestra que se construyeron en la segunda década del siglo III. El mayor de los navíos de Nydam confirma y completa

3. EL GRAN YACIMIENTO PANTANOSO DE EJSBEL, al este de Jutlandia, es el segundo santuario para ofrenda de armas explorado en estos últimos años. El principal período de sacrificios se data hacia el año 300. Como ciertos objetos de Illerup, los de Ejsbel pasaron por el fuego y fueron después limpiados antes de arrojarlos al lago. La riqueza de algunas ofrendas del siglo V induce a suponer que hubo en la región una elite principesca. Se han sacado a la luz hebillas de cinturón de guerreros ricos (*a*) y un suntuoso pomo de espada (*b*).





MICHEL KAZANSKI/*Pour la Science*



4. LAS TRES EMBARCACIONES HALLADAS EN NYDAM (Dinamarca) constituyen el hallazgo más notable hecho en Europa del Norte de navíos anteriores a la época vikinga. El que mejor se conserva, construido con grandes planchas de roble imbricadas, sujetas unas a otras con clavos de hierro, servía para transportar a unos cuarenta guerreros bien pertrechados. Ofrecidos estos barcos a los dioses, se los llenó de armas y otras ofrendas antes de hundirlos. Salta a la vista que las técnicas metalúrgicas que se emplearon para fabricar las armas sacrificadas se inspiraban en las de los armeros romanos.

lo que Tácito nos había informado acerca de los navíos escandinavos de la época romana.

En la zona meridional del mundo escandinavo han sido hallados otros muchos yacimientos de sacrificios, datables alrededor del 300. Con su abundancia de ofrendas de carácter guerrero, atestiguan la militarización de la sociedad y ponen también de manifiesto que allí fueron evolucionando a la par entidades territoriales muy estructuradas y militarizadas. Henos, pues, aquí muy lejos ya del tranquilo y apacible mundo de los germanos de antaño: estas entidades militarizadas eran “jefaturas”, es decir, sociedades dirigidas por un jefe, a menudo sacralizado y encargado también de desempeñar funciones cultuales, militares, administrativas y económicas (en particular de la recepción y la distribución de los dones aportados por todos los miembros de la comunidad). Tal jefe estaba a la cabeza de una jerarquía basada en la desigualdad de los clanes y las familias. Cada jefatura se divide en grupos (comunidades aldeanas, clanes) que tienen sus propios subjefes. Es en el seno de las jefaturas donde aparece la especialización de los individuos por profesiones: agricultor, artesano, sacerdote y guerrero.

Unas sociedades preestatales

Una sociedad así no es estatal, pues le faltan la administración, el derecho escrito y la justicia. Su orden estriba en la tradición, en el derecho consuetudinario y en el prestigio del jefe y de su clan. Existen dos tipos de jefaturas: las simples, con un jefe que manda sobre varias comunidades, y las complejas, que agrupan a varias jefaturas periféricas en torno a una central en la que reside un jefe supremo. Es una vez alcanzado este estadio cuando se forma una verdadera elite dirigente, capaz de planificar y emprender una campaña militar de gran amplitud, como la que se desarrolló en torno al año 300 en la región del Kattegat. Las grandes tribus germánicas de cuya supremacía sobre los territorios nórdicos informa Tácito corresponden seguramente a jefaturas complejas. Tales entidades quizás estuviesen en el origen de la brusca migración de los cimbrios y de los teutones en el 113 a.C.

Una vez formadas, las jefaturas complejas evolucionan en muchos casos hacia la realeza. En Escandinavia, el proceso lo patentiza el material arqueológico de la época de las grandes invasiones. Este período, que va de finales del siglo IV a finales del V, es el de la progresiva disgregación del Imperio Romano de Occidente. Toda Europa es entonces quebrantada por movimientos de pueblos (hunos, godos, vándalos, burgundios, etcétera). Escandinavia, en cambio, no participa en esa tendencia general. Allí se asiste a un período de ampliación de los territorios germánicos hacia el norte (hasta la zona polar), así como hacia el interior de la península. Los





5. ESTE MAGNIFICO COLLAR DE ORO se recuperó en Möne, en el norte de Suecia. Ilustra la riqueza de la clase noble que vivía en el centro de Suecia, en la región de Uppsala, por la época de las grandes invasiones (finales del siglo IV y V). En algunos casos, sus miembros se hicieron inhumar bajo túmulos enormes junto con ricas ofrendas funerarias, entre las que estuvo este collar. Llevarlo puesto debía de ser más fácil de lo que parece. Consta de siete tubos huecos a los que une y recubre un trenzado de hilos de oro, cuyos intersticios rellenan 458 adornos diferentes, finamente cincelados. El conjunto pesa sólo 823 gramos.

MICHEL KAZANSKI/*Pour la Science*

yacimientos típicos de este fenómeno son de poblados agrícolas en los que se hallan grandes casas de 30 a 90 metros y sus correspondientes necrópolis. Ese tamaño atestigua la presencia de una gran familia que desempeñaba un importante papel económico y social.

La arqueología prueba que, junto a estas comunidades pioneras, se va afirmando una elite de señores y guerreros. Pensamos, concretamente, en lo que revelan los imponentes túmulos "regios", que señalan los centros del poder y testimonian la aparición de "reinos". El túmulo de Raknehagen, por ejemplo, el mayor de Noruega, mide 15 metros de altura y 95 metros de diámetro. Su erección, que debió de ocupar a 500 hombres durante un verano entero, resulta inimaginable en una sociedad poco estructurada. Se ha podido datar este túmulo, situado en una de las regiones más fértiles del sur de Noruega, gracias a los restos de maderas que contenía: se remonta a mediados del siglo VI.

Una expansión basada en el comercio del hierro y las pieles

En Suecia, en la región de Medelpad, colonizada bastante tarde, se hallan otros túmulos "reales". Así, en Högom, un grupo de cuatro grandes túmulos del siglo V está situado junto a una necrópolis formada por otros de menores dimensiones. Un túmulo que no fue saqueado nos proporciona muchos datos sobre los ritos fúnebres de los germanos del norte. En su centro, una cámara de madera de 5 por 2 metros, recubierta con una capa de gruesos pedruscos, contenía armas (espada, escudo, lanza, flechas y hachas), piezas de arnés, un cinturón con algunos adornos colgantes y varios utensilios, valiosa vajilla; también un bastón de madera, que los arqueólogos suecos han interpretado como símbolo de poder.

Otra señal de la aparición de una elite nobiliaria entre los guerreros nos la ofrece la multiplicación de los tesoros enterrados durante el transcurso de los siglos V y VI. ¿Quién, si no tal elite, habría podido acumular tantos bienes preciosos? En Dinamarca, la mayor cantidad de oro de aquella época proviene de las islas de Lolland y Seeland, así como del este y del norte de Jutlandia. Aureos tesoros fueron también enterrados (y han sido hallados) en las islas de Gotland y de Öland, además de en la Suecia media y meridional. En tumbas dispersas por el sur de Escandinavia se han recuperado bracteados (*véase la figura 1)*, es decir, medallones de oro que imitan piezas romanas.

La aparición de reinos en Suecia se explica sobre todo por el auge económico impulsado por el comercio que se desarrolla en la zona báltica durante los siglos V y VI. Cuero, hierro y ámbar forman parte de las mercancías que se transportan por el Báltico antes de ser encaminadas hacia Occidente o hacia Constantinopla a través de Rusia. La Suecia central se convierte en poderoso centro de producción de hierro, del que se transportan grandes cantidades. Según el testimonio de Jordanès, historiador del siglo VI, Suecia se erige en centro principal del comercio de pieles.

Los emporios mercantiles bálticos, que en la época romana se situaban en Dinamarca, en las islas de Seeland y de Fionia, se desplazaron más al este, hacia Öland, Bornholm y Gotland, como lo confirman los



6. EL CASCO DE VALSGARD es un ejemplo típico de equipamiento guerrero de la era de Vendel (siglos VI-VIII), cultura posterior a la época de las grandes invasiones y en cuyo seno emergió en la Suecia central una rica clase nobiliaria. Los protectores de la nariz y los ojos forman unos lunetos que imitan un rostro. Refuerzan su carácter intimidatorio unas cejas pintadas sobre las placas que protegían los arcos ciliares. No menos imponente es la cortina de cota de malla que, suspendida de los bordes del casco, protege la parte inferior de la cabeza.

MICHEL KAZANSKI/*Pour la Science*

tesoros numismáticos hallados. En estas últimas islas se han encontrado más de 700 sólidos (monedas de oro romanas y bizantinas) que datan de los siglos V y VI. Su cronología prueba que es la isla de Öland la receptora más importante de ese aflujo monetario con anterioridad al año 477, antes de ceder el predominio a la isla de Bornholm entre el 475 y el 525, la cual lo cedió luego a Gotland entre el 500 y el 550.

¿Cómo llegó a Escandinavia este oro romano? Probablemente, traído por algunos mercenarios nórdicos que luchaban entonces en los ejércitos europeos. Sea de ello lo que fuere, esta época de afluencia de oro coincide con los primeros testimonios de la expansión militar de los escandinavos.

Hérulos, anglos y jutos al ataque

Así, en 455 y en 459, los hérulos noruegos atacan con sus naves las costas de la península Ibérica. Durante el siglo V (a partir del año 430), los anglos y los jutos participan en la conquista sajona de la isla británica. A comienzos del siglo VI, Clocilaico, rey de los daneses,

cae muerto por los francos en la costa gala, terminando así en desastre una expedición de los piratas escandinavos. No tenemos ningún testimonio escrito referente a la actividad militar escandinava en la zona del mar Báltico durante esta época. Sin embargo, las necrópolis con fuerte componente escandinavo de la costa báltica (por ejemplo Proosa en Estonia o Glowezyce en Pomerania) y las numerosas armas que contienen son más que elocuentes. El aumento de la tensión en el mar Báltico explica, quizás, el que a mediados del siglo VI se interrumpiera la llegada de sólidos a Escandinavia, así como el rápido incremento del número de fuertes en Suecia, aun suponiendo que algunas fortalezas fueran erigidas con anterioridad, como sería el caso de Eketorp, en la isla de Öland (*véase la figura 1)*.

De todos estos indicios se saca la impresión de que el centro de Suecia estuvo dominado por las elites guerreras durante la segunda mitad del siglo VI. Por esta época, la región se hallaba en pleno auge económico, como lo atestigua la aparición de un emporio (una concentración de artesanos y comerciantes) en Helgö (isla del lago Malären, no lejos de Estocolmo), cuya actividad económica se extendió por Finlandia y Noruega hasta más allá del círculo polar.

Una jerarquía en el seno de las elites

El material funerario de esta época patentiza la existencia de una jerarquía en el seno de las elites dirigentes. Ciertos jefes locales se hacen incinerar y después inhumar bajo un túmulo. Es el caso del enterrado bajo el túmulo Ottarshögen ("tumba de Ottar") no lejos de Uppsala, en Suecia, o el de un enterramiento de finales del siglo VI que contenía un estrato de mezcladas cenizas de incineración. Otros jefes, más numerosos éstos, se hacen inhumar en barcos cargados de riquezas: espadas, cascos, armaduras..., pero también vestimentas y diversos tejidos, útiles de cocina, servicios de mesa, etcétera. Estas tumbas-barcos, dichas "de tipo vendel" según el yacimiento epónimo, son frecuentes entre la segunda mitad del siglo VI y la mitad del VIII.

Mas las tumbas de tipo vendel resultan mediocres si las comparamos con la monumentalidad de los túmulos regios que dominan Gamla Uppsala, pequeña población situada no lejos de Uppsala, la vieja capital y centro sagrado de la Suecia antigua. Tres túmulos majestuosos, de 60 a 70 metros de diámetro (*véase la figura 1)* y de 9 a 12 metros de altura, son atribuidos a la primera de las dinastías suecas. Apellidada Yngling, esta sacralizada dinastía es conocida por una saga que adquirió su forma definitiva en el siglo XIII.

Dos de los tres túmulos fueron excavados en el siglo XIX. En la base de los mismos se descubrieron estratos de cenizas de incineración bajo un edificio de madera recubierto de arcilla y rodeado de piedras. El mobiliario de las tumbas lo constituyen armas, joyas, vajillas, utensilios, muebles, todo ello destruido por el fuego. Entre las cenizas se encontraban también osamentas de caballo, de buey, de perro, de carnero, de cabra y otros. Recientemente, el arqueólogo polaco Wladyslaw Duczko ha datado estos dos túmulos —Västhögen y Östhögen— como de finales del siglo VI o comienzos del VII, a partir de una espada de gala y de elementos decorativos. Según el historiador Adán de Bremen, del siglo XI, junto a los túmulos había un bosque sagrado con un santuario y un "ting", es decir, un lugar de reunión para el pueblo. El conjunto de santuario, "ting" y necrópolis sagrada indica que aquel era el centro político y sacro del reino sueco.

Los datos de la arqueología funeraria sueca dibujan la pirámide social de la época previkinga: en su cúspide están los reyes de Uppsala, por debajo de ellos los jefes guerreros de las tumbas-barco y, por último, el resto de la población. Tenemos aquí, sin duda, un ejemplo de "reino bárbaro", o sea, uno de los numerosos reinos que aparecen en Europa tras la caída del Imperio Romano y en los que el poder se basa, como en una jefatura, en el derecho consuetudinario y en el carisma del jefe.

Faltan aún el derecho escrito y las instituciones necesarias para su aplicación (fuerza pública, sistema judicial), por lo que todavía no se puede hablar de estado. No obstante, este reino se distingue de una jefatura compleja, por cuanto en él los privilegios de los clanes tienden a ceder terreno a los de grupos sociales. Así, en torno al rey, sus fieles, a menudo de origen extranjero, ocupan un lugar cada vez más importante y acaban remplazando a la antigua aristocracia tribal. En estos reinos, el rey no es tanto un líder carismático cuanto un jefe militar que lleva a sus tropas al combate.

Así, el material arqueológico escandinavo de la época romana y de principios de la Edad Media traduce el progresivo emerger de elites primero guerreras y después nobiliarias, y con ello de jefaturas y finalmente de reinos precursores de los estados. Dentro de los reinos aparecidos en los siglos IX y X, los numerosos príncipes y sus guerreros representaban una amenaza directa para el poder central, pues aquellos hombres indisciplinados no podían tener todos cabida en los ejércitos reales. Tal situación y el crecimiento de una población que llegó a ser relativamente próspera explican, sin duda, la explosión vikinga del siglo IX, que tantas huellas dejó en la memoria colectiva europea.

El autor

Michel Kazanski, investigador del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia (CNRS), trabaja en el centro de historia y civilización bizantinas del Colegio de Francia.

Bibliografía complementaria

LES GERMAINS. R. Hachmann. Nagel; Ginebra, 1971.

VORGESCHICHTE SCHWEDENS. J. M. Stenberger. Akademie Verlag; Berlín, 1977.

IRON-AGE SOCIETIES. FROM TRIBE TO STATE IN NORTHERN EUROPE, 500 BC TO AD 700. L. Hedeager. Blackwell, Oxford-Cambridge, 1992.

LES SACRIFICES DE BUTIN DE GUERRE DANS LE SUD DE LA SCANDINAVIE À PARTIR DES RECHERCHES DE LA VALLÉE D'ILLERUP AU DANEMARK. J. Ilkjaer en *La Noblesse Romaine et les Chefs Barbares du IIIe au VIIe Siècle*. Association Française d'Archéologie Mérovingienne, Saint-Germain-en-Laye, págs. 101-112; 1992.

LEGO MOLECULAR

Una colección sencilla de pequeños bloques de construcción se aplican al diseño y la fabricación de estructuras nanométricas, programadas para adoptar cualquier forma deseada

Christian E. Schafmeister

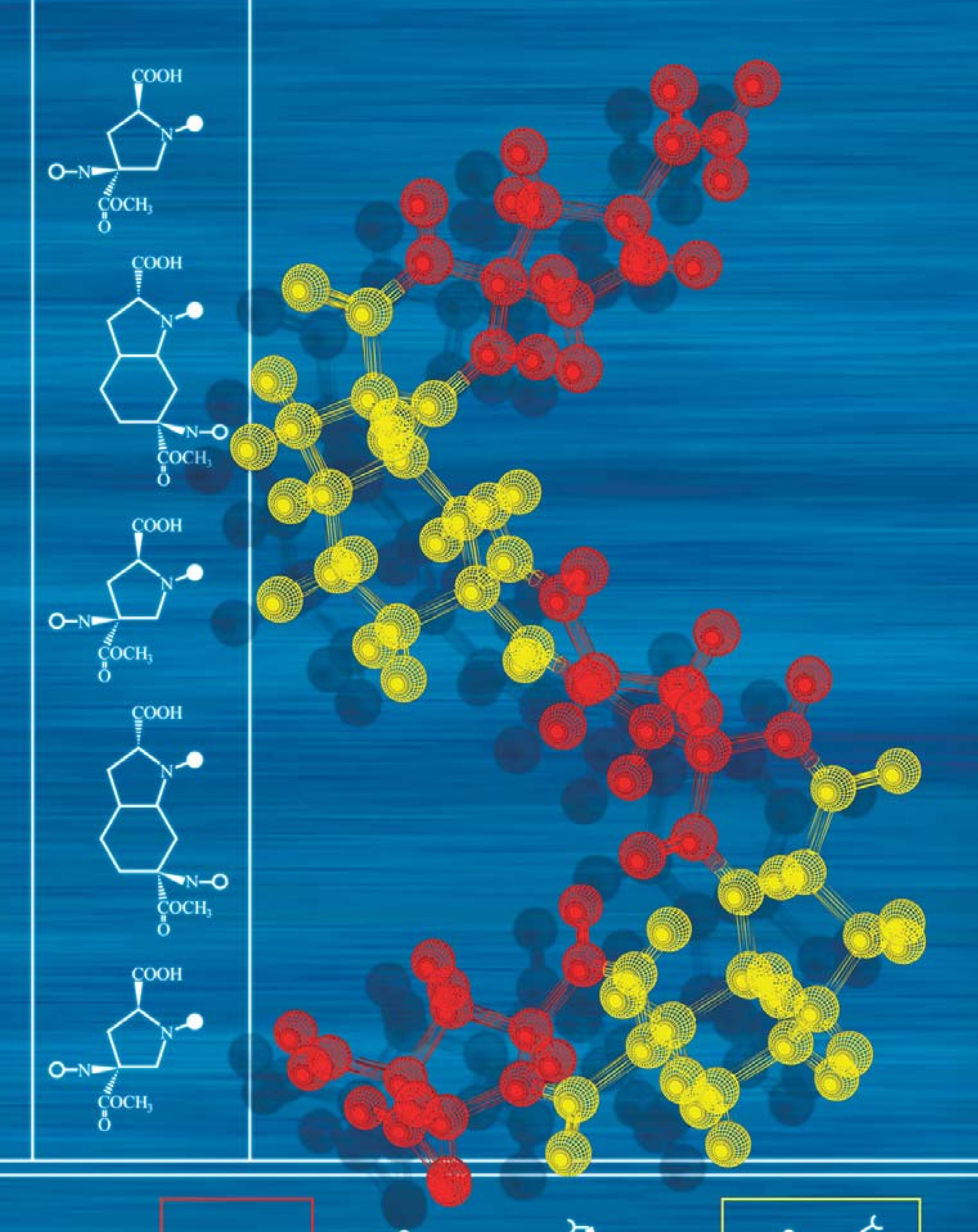
Las proteínas, las "nanomáquinas" fundamentales para la vida, han ilustrado a un gran número de científicos que, como yo, se dedican al desarrollo de nanomaquinaria. Constituyen moléculas de gran tamaño: contienen entre cientos y miles de átomos; oscilan entre unos pocos nanómetros (milmillonésima parte de un metro) y unos diez nanómetros de ancho. Nuestro organismo cuenta con al menos 20.000 proteínas. Entre otras funciones, son responsables de la contracción muscular, la digestión de la comida, la construcción de los huesos, la detección del entorno y el reciclaje permanente de cientos de pequeñas moléculas en nuestras células.

En 1986, siendo estudiante universitario de química, soñaba con la posibilidad de diseñar y sintetizar macromoléculas (moléculas con más de 100 átomos) que realizaran las asombrosas tareas que llevan a cabo las proteínas y otras más. Mi experiencia con la programación de ordenadores empezó con la aparición de los primeros TRS-80, a finales de los años setenta. Pensaba que sería maravilloso si la construcción de máquinas moleculares complejas fuera tan fácil como el desarrollo de programas informáticos. Me proponía crear un "lenguaje de programación para la materia": una combinación de *software* y química que describiera la forma de una nanomáquina y determinara luego la secuencia de procesos que debería realizar un químico o un robot para la construcción del nanodispositivo.

Sin embargo, la construcción de nanomáquinas a partir de proteínas de diseño tropieza con un obstáculo importante. Una proteína consta de una cadena lineal simple, formada por una secuencia específica de aminoácidos extraídos de un repertorio de tan sólo 20. Hasta aquí bien. Pero las características de una proteína y las funciones que desempeña dependen de su forma. Al poco de constituirse, la cadena aminoacídica colapsa en una maraña de hélices y otras estructuras, a través de un complejo proceso de plegamiento proteico. La secuencia de aminoácidos determina la forma final, pero predecir qué forma proteica corresponde a una secuencia aminoacídica concreta constituye uno de los mayores retos científicos por resolver.

OBTENCION DE NANOESTRUCTURAS de inspiración proteica: a partir de una colección de bloques de construcción moleculares (*abajo*) diseñados para unirse entre sí se fabrican macromoléculas rígidas cuya forma final está predeterminada. El proceso guarda semejanza con la construcción de estructuras a partir de piezas de lego.

KEN EWARD *BioGrafx*


COOH
N
N
COCH3
O
COOH
N
N
COCH3
O
COOH
N
N
COCH3
O
COOH
N
N
COCH3
O
COOH
N
N
COCH3
O

Unos 20 años después de empezar a soñar con la construcción de nanomáquinas, mi laboratorio ha desarrollado un método de producción de macromoléculas con formas predecibles, así como los programas informáticos necesarios para el diseño de las mismas. Nuestro trabajo se inspira en la modularidad de las proteínas naturales. No remeda, en cambio, el colapso espontáneo de las cadenas aminoacídicas; evitamos así el problema del plegamiento.

Con el desarrollo de esa técnica nos proponemos crear moléculas que lleven a cabo funciones específicas. Por botón de muestra: sensores, macromoléculas que cambian de forma y color cuando se unen a moléculas diana concretas, como la glucosa, toxinas o armas químicas. La formación del nuevo enlace desencadena en el sensor el movimiento conjunto de dos grupos fluorescentes; ello provoca un cambio de color que indica la presencia de la molécula diana en la muestra. Se aplica el mismo método a la creación de moléculas bisagra que se abren y cierran en respuesta a una señal externa, lo que constituye un paso hacia la construcción de accionadores, válvulas moleculares y memorias de ordenador.

En última instancia, nuestra técnica conducirá a un método más refinado de construcción de nanomáquinas. Se utilizaría para la fabricación de nanoherramientas complejas; por ejemplo, un ensamblador que, al igual que el ribosoma responsable de la síntesis proteica en las células, montaría nanomáquinas bajo control externo del programador. Por ahora, esta segunda fase del proyecto pertenece al dominio de los sueños.

Resumen/*Nanolego*

- Las proteínas corresponden a nanomáquinas naturales que cumplen múltiples funciones biológicas. Constan de cadenas aminoacídicas flexibles que adoptan conformaciones complejas; por esa razón no resulta tarea fácil la predicción de la forma, ni de la función de nuevas proteínas.
- Se han desarrollado bloques de construcción moleculares, los bis-aminoácidos, que se unen entre sí para formar estructuras de tipo proteico que poseen formas rígidas, altamente predecibles y programables.
- Las aplicaciones potenciales de estos bis-péptidos incluyen fármacos, enzimas, sensores químicos, nanoválvulas y dispositivos de almacenamiento de memoria para ordenadores.

Lecciones de la naturaleza

Cuando acabé mis estudios universitarios en 1990, pensaba que el camino para la construcción de nanomáquinas dependía de la deducción de las reglas que rigen el plegamiento proteico y de su aplicación a la obtención de nuevas proteínas. Entré, por esas fechas, en el grupo de cristalografía de proteínas de Robert M. Stroud, de la Universidad de California en San Francisco. Los cristalógrafos obtienen cristales de las proteínas y determinan luego, mediante rayos X, la disposición tridimensional exacta de sus átomos. Esa herramienta me permitió valorar con detalle la complejidad y belleza de la estructura proteica.

Invertí cuatro años en la consecución de 4HB1, una proteína sintética. Comencé por ensamblar un gen artificial y lo inserté en bacterias, que llevaron a cabo la expresión del mismo: es decir, fabricaron la proteína codificada por el ADN. Cristalicé luego la proteína resultante. Por fin, determiné su estructura cristalina. Resultó excitante comprobar que 4HB1 adoptaba la conformación proyectada.

Pero 4HB1 no nos llevó a ninguna parte. Se comportaba sólo como una proteína artificial perfectamente plegada. El experimento no desveló las reglas sencillas que necesitábamos para crear otras proteínas con la forma deseada, lo que nos llenó de frustración. Sucedía lo contrario: la complejidad del plegamiento proteico sugería que tales reglas podían no existir. En 1997, mientras terminaba el doctorado, llegué a la conclusión de que una forma mejor de fabricar nanomáquinas a medida consistiría en obtenerlas a partir de un número limitado de bloques de construcción que no adoptaran la forma final mediante el sistema de plegamiento proteico.

La idea no era nueva. En 1995, Brent Iverson, de la Universidad de Texas en Austin, había desarrollado bloques de construcción que se unían entre sí para generar polímeros cortos. Los oligómeros conseguidos se autoensamblaban luego para generar estructuras plegadas conforme los grupos dadores ricos en electrones atraían a los grupos aceptores deficientes en electrones.

Al propio tiempo, Sam Gellman, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Dieter Seebach, del Instituto Politécnico Federal Suizo en Zúrich, estaban desarrollando otros polímeros sintéticos: beta-péptidos, cadenas flexibles de beta-aminoácidos (moléculas en su mayoría no naturales cuya estructura difiere ligeramente de la de los aminoácidos habituales, los alfa-aminoácidos) que se pliegan en hélices retorcidas.

Esos nuevos métodos de construcción de macromoléculas que adoptaban una forma específica parecían arrojar nueva luz a la cuestión. Sin embargo, no hacían más que sustituir un problema de plegamiento por otro. La dificultad estribaba en que las proteínas naturales y esas moléculas sintéticas poseen cadenas de moléculas conectadas mediante enlaces sencillos que confieren a la estructura un alto grado de libertad para retorcerse en cualquier posición a lo largo de toda su longitud. El modo en que uno de estos monómeros se orienta para adquirir la forma final depende de la compleja interacción entre las fuerzas de atracción y fuerzas de repulsión que operan entre los distintos bloques de construcción a lo largo de la cadena.

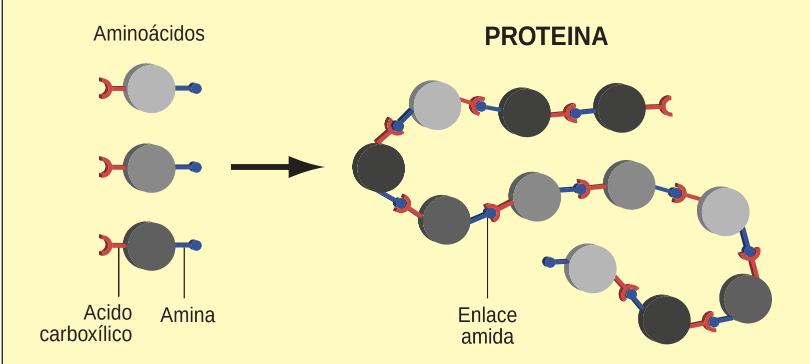
Yo tenía en mente un método más radical: se trataba de ganar control sobre la forma del producto final mediante la eliminación del sistema habitual de plegamiento. Para ello se requerían bloques de construcción rígidos, que se unieran a través de *pares* de enlaces: se obtendrían así macromoléculas rígidas en escalera. Esa idea se había ensayado con anterioridad. En 1987, Fraser Stoddart, entonces en la Universidad de Sheffield, introdujo el concepto de “lego molecular”: la formación de cintas y collares moleculares a partir de bloques de construcción.

Me agregué al grupo de Gregory Verdine, de la Universidad de Harvard, con el propósito de aprender química orgánica sintética. Tras dedi-

DIFERENCIAS ENTRE BIS-PEPTIDOS Y PROTEINAS NATURALES

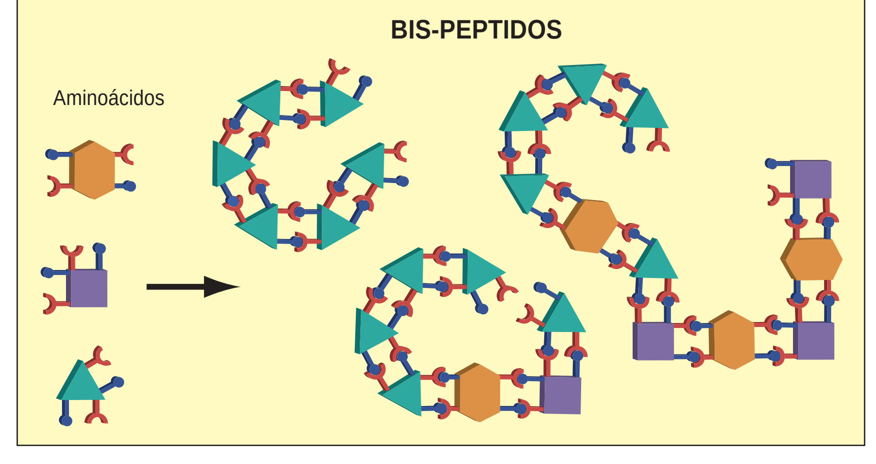
PROTEINAS NATURALES

A partir de un repertorio de 20 aminoácidos que se enlazan entre sí, los organismos fabrican cadenas flexibles: se denominan péptidos cuando constan de pocos aminoácidos y proteínas cuando son de mayor tamaño. Los aminoácidos se unen mediante enlaces amida entre los grupos amina y ácido carboxílico. La forma final de la proteína depende del complejo juego de interacciones que tienen lugar entre los aminoácidos a lo largo de la cadena. Esta complejidad hace que resulte extremadamente difícil predecir qué forma adoptará una secuencia de aminoácidos determinada.



BIS-PEPTIDOS SINTETICOS

Los químicos han sintetizado una biblioteca de bloques de construcción, los bis-aminoácidos, que cuentan con dos pares de aminas y ácidos carboxílicos. Cuando se unen entre sí, estos monómeros forman una cadena rígida, o bis-péptido, que posee una forma predecible, predeterminada por la secuencia de bis-aminoácidos. Por tanto, se pueden diseñar y construir nanoestructuras simplemente mediante la combinación de bis-aminoácidos en un orden específico.



MELISSA THOMAS

car dos años a la síntesis de aminoácidos y a la búsqueda de un camino para mi ambicioso proyecto, encontré un artículo sobre la dicetopiperazina: un anillo de seis átomos que contiene dos grupos amida. Los enlaces amida mantienen unidos los aminoácidos que constituyen una cadena proteica, igual que una fila de personas tomadas de la mano. En una dicetopiperazina, dos aminoácidos se unen como dos personas frente a frente y con las manos enlazadas, cerrando un anillo con los brazos.

Los químicos han desarrollado numerosas reacciones para la formación de enlaces amida entre aminoácidos. La estructura de la dicetopiperazina es sobradamente conocida, pues ésta constituye uno de los subproductos indeseados que interfieren en la síntesis de proteínas. Utilizaría la formación de la dicetopiperazina para unir mis bloques de construcción.

El resto de la idea cuajó enseguida. De acuerdo con la imagen anterior, los dos "brazos" de un aminoácido corresponden a una amina y un ácido carboxílico (a diferencia de los brazos de las personas, sin embargo, estos grupos químicos apenas sobresalen del cuerpo). Un enlace amida vendría a ser, pues, una mano izquierda que sujeta una mano derecha. Un bloque de construcción, o monómero, equivaldría a un grupo de dos personas atadas fuertemente (por ejemplo, espalda con espalda), cada una con los brazos enfrente de ella. Para conectar un monómero con el siguiente, una de las dos "personas" del primer monómero sostendría ambas manos de una de las dos personas del segundo monómero: se formaría así el anillo de dicetopiperazina.

En términos químicos, cada monómero constaría de una molécula rígida compuesta, en su mayor parte, por átomos de carbono. En ella se alojarían dos aminoácidos, cuyas aminas y ácidos carboxílicos habrían de situarse de suerte tal, que pudieran enlazarse con otros monómeros. Dos monómeros se unirían mediante un aminoácido de cada uno, que reaccionarían para formar un anillo de dicetopiperazina. Denominamos a estos monómeros "bis-aminoácidos", ya que cada uno contiene dos aminoácidos. Y dado que las cadenas de aminoácidos se llaman péptidos, una cadena de bis-aminoácidos sería un "bis-péptido".

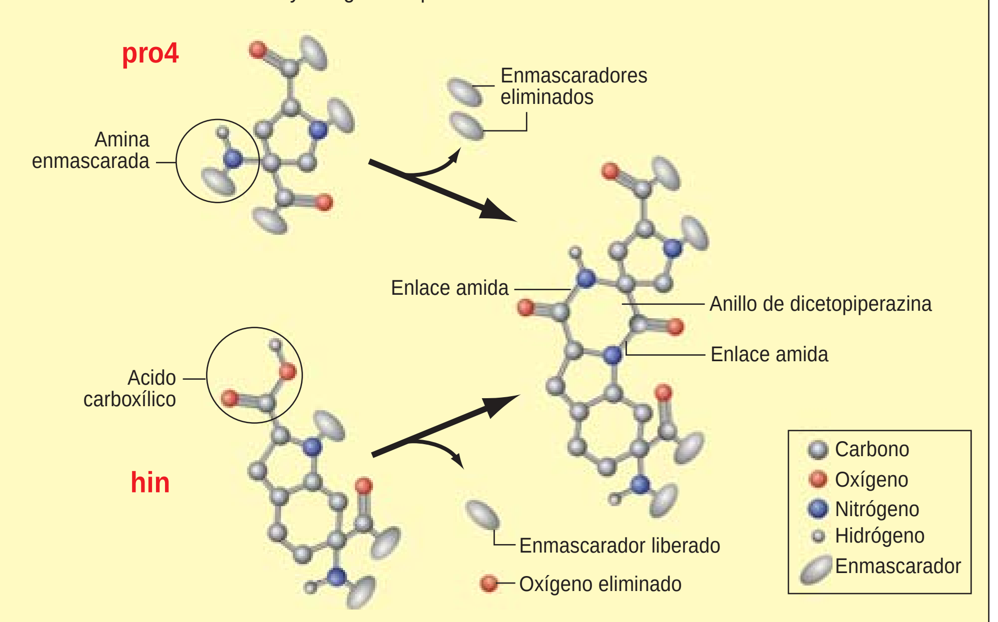
Bis-aminoácidos y bis-péptidos

Con los "planes" de una serie de bloques de construcción en la mano, puse en marcha un nuevo laboratorio en la Universidad de Pittsburgh. Allí, mis colaboradores y yo desarrollaríamos la química sintética necesaria para hacer realidad nuestro sueño. En dos años, Christopher Levins, uno de mis primeros doctorandos, había sintetizado los primeros bis-aminoácidos. Empezó con la hidroxiprolina, un componente (disponible comercialmente) del colágeno, la proteína que fortalece el cartílago, los ligamentos y tendones. (Otro grupo había utilizado con anterioridad esa molécula para la obtención de estructuras semejantes a nuestros diseños monoméricos.)

Mediante una ruta sintética de nueve etapas, Levins transformó la hidroxiprolina en cuatro tipos de bloques de construcción: pro4 (2S4S), pro4(2S4R), pro4(2R4S) y pro4(2R4R). Los llamamos "pro4" ya que todos guardan semejanza con el aminoácido prolina y cuentan con un aminoácido adicional sobre el carbono 4. Las etiquetas "S" y "R" indican la orientación de los grupos unidos al carbono 2 y al carbono 4.



En la práctica, los bis-aminoácidos se sintetizan con grupos protectores, o enmascaradores, para evitar la formación indiscriminada de enlaces entre ellos. Mediante una serie de etapas (*no ilustradas aquí*), se unen dos monómeros (por ejemplo "pro4" y "hin"): se induce la formación entre ellos de un anillo de dicetopiperazina (*verde*). La rigidez de éste y los otros anillos resta flexibilidad a la estructura y asegura la predictibilidad de la forma resultante.



Los cuatro productos se mantienen estables (en forma de polvo seco) tras meses de almacenamiento a temperatura ambiente.

Sintetizamos esos bloques de construcción monoméricos con grupos protectores unidos a las aminas (para evitar la formación de enlaces amida hasta el momento deseado) y con uno de los ácidos carboxílicos en forma de éster (una versión modificada, menos reactiva). Para sintetizar un bis-péptido, ensamblamos los bloques de construcción en la secuencia de interés mediante enlaces sencillos; los unimos luego mediante un segundo enlace para aumentar la rigidez. A través de esas dos fases, Levins obtuvo las primeras estructuras sencillas hechas de monómeros de pro4.

Se acomete la primera fase con la técnica de síntesis en fase sólida. Para ello se utilizan bolitas de resina polimérica que incorporan un grupo amina. El ácido carboxílico del primer bloque de construcción forma un enlace amida con una de las aminas; de ese modo, el bloque de construcción queda fijado sobre la bolita de resina. Trabajar con un exceso de bloques de construcción asegura que todas las aminas de la resina posean un bloque de construcción unido a ella. Un lavado rápido con un disolvente arrastra los productos secundarios y los bloques de construcción sobrantes. A continuación, se elimina, mediante un lavado con una base, el grupo protector de una de las dos aminas del nuevo bloque de construcción añadido (las dos aminas poseen grupos protectores distintos, de manera que se produce la remoción de sólo uno de ellos). Se añade un segundo bloque de construcción, que se une al primero mediante su ácido carboxílico y la amina libre. Se elimina, entonces, la protección de una de sus aminas, se añade un tercer monómero, y así sucesivamente.

Este proceso de construcción avanza con lentitud. La adición de un monómero tarda alrededor de una hora, pues debe esperarse a que casi todas las aminas libres incorporen su bloque de construcción. Para nuestra fortuna, el trabajo se automatiza con robots empleados para la síntesis de péptidos; construyen en paralelo y sin dificultad un número notable de secuencias.

Cuando se termina una cadena, se elimina, mediante un ácido fuerte, la bolita de resina polimérica; se quita luego el grupo protector de la segunda amina de cada bloque de construcción. Se acomete entonces la segunda fase de la síntesis bis-peptídica: mediante la adición de una disolución básica se logra que la amina libre de cada bloque ataque al éster del bloque precedente para formar un segundo enlace amida. Con dos enlaces amida conectando cada par de bloques de construcción adyacentes, la molécula gana rigidez y adopta una forma predecible y bien definida.

Pronto descubrimos que los bis-péptidos eran solubles en agua y otros disolventes orgánicos polares (disolventes que se mezclan con el agua). La hidrosolubilidad de los bis-péptidos facilita su estudio; asimismo, sugiere que podríamos utilizarlos para el desarrollo de nuevos medicamentos, pues éstos deben disolverse y dispersarse a través del torrente sanguíneo.

Programación de formas

Los bis-aminoácidos que componen nuestros bis-péptidos se unen de modo similar a como lo hacen las piezas del lego. En concreto, guardan semejanza con los ladrillos cuyo relieve superior se adapta a los huecos de su cara inferior. Mediante el apilamiento de varios ladrillos del mismo tipo se obtiene una superficie curva; la forma depende de qué aminoácido se escoja. A partir de sólo dos tipos de ladrillos se construyen 2^N formas distintas (N corresponde al número de ladrillos en la pila). Un bis-péptido de 10 bloques de longitud, hecho a partir de nuestros cuatro bis-aminoácidos tipo pro4, podría adoptar cualquiera de un millón (4^{10}) de formas. Cuanto más amplio sea el abanico de bloques de construcción, mayor será nuestra capacidad de controlar la forma final de la macromolécula. El desafío se centra, pues, en el diseño y síntesis de secuencias "bis-aminoacídicas" útiles.

La clave para el diseño de bis-péptidos con formas determinadas reside en el conocimiento de la forma que nuestros bis-aminoácidos adoptan cuando se unen entre sí. Esta información —que vendría a ser el tamaño de cada ladrillo y la curvatura de sus relieves— constituiría la base para nuestro "lenguaje de programación de la materia". Una vez sintetizados

MELISSA THOMAS

los primeros bis-péptidos, llevaríamos a cabo mediciones para averiguar de qué manera se acomodan sus piezas.

Realizamos experimentos de resonancia magnética nuclear para determinar qué átomos de hidrógeno de un bis-péptido se encontraban cerca de otros. Mediante otras técnicas, medimos la orientación de los enlaces carbono-hidrógeno. Aprovechamos esa información estructural para crear un programa de diseño automático de la construcción de bis-péptidos: se llamaría CANDO (de "Computer-Aided Nanostructure Design and Optimization", diseño y optimización automáticos de nanoestructuras).

Gregory Bird, otro doctorando de mi laboratorio, aplicó CANDO al proyecto de cilindros moleculares y estructuras curvas. Procedió luego al ensamblaje de los mismos. Para verificar que los productos de la reacción encajaban con el diseño original, unió un marcador de espín a ambos extremos de cada secuencia. Las secuencias con bloques de construcción pro4(2S4S) y pro4(2R4R) adoptaron formas de tipo C y S, tal y como CANDO predijo.

Los bis-aminoácidos pro4 equivaldrían a los ladrillos del lego con bordes poco inclinados. Se usan para la fabricación de formas cilíndricas y de curvatura suave, que operarían a modo de postes para el anclaje de grupos químicos en posiciones específicas. Ocurre, sin embargo, que gran parte de las funciones proteicas se deben a la presencia de cavidades, que sirven para enlazar la proteína a determinada diana o para alojar moléculas y catalizar reacciones. La fabricación de bis-péptidos macizos con cavidades requería la ampliación de nuestro repertorio de bloques de construcción. Stephen Habay, estudiante de nuestro grupo, dio el primer paso hacia este objetivo mediante el desarrollo de "hin" (abreviatura de hidroindol), un bis-aminoácido que crea en un bis-péptido una curva cerrada.

Año tras año, la colección de monómeros continúa creciendo. Las simulaciones de CANDO sugieren que, con nuestro repertorio actual de 14 monómeros, nos basta para crear bis-péptidos compactos con cavidades. Sin embargo, cuando desarrollamos nuevos bloques de construcción y los incorporamos en los bis-péptidos, tropezamos con una dificultad: la formación del segundo enlace amida (el que confiere rigidez a la estructura) procedía con rapidez entre monómeros pro4, pero se tornaba lenta para el resto de los nuevos bloques de construcción. Aunque el aumento de la temperatura aceleraba el proceso, las formas resultantes se mezclaban de forma aleatoria. El problema se convirtió en un duro impedimento para la creación de bis-péptidos de mayor tamaño y complejidad.

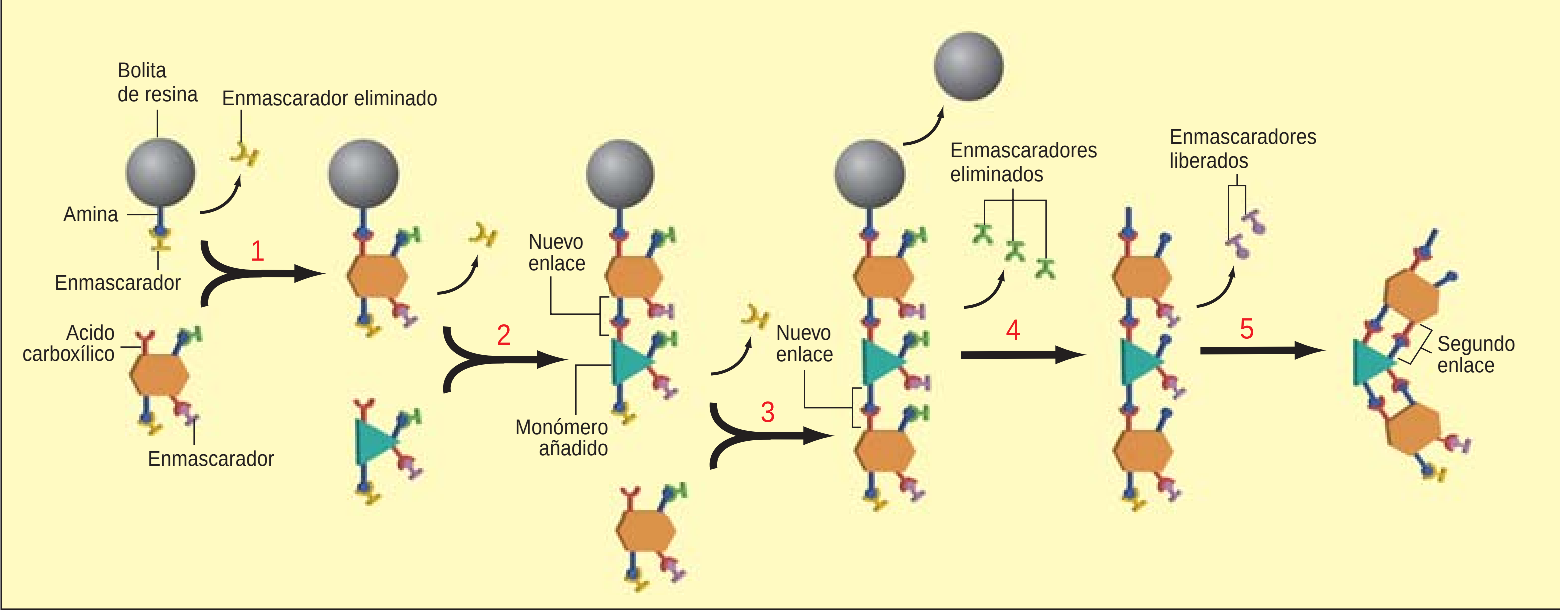
Sharad Gupta, otro miembro del grupo, superó parcialmente el escollo, mediante el desarrollo de un nuevo método para el cierre del segundo enlace amida. Cambió el éster de los monómeros por otro éster más expuesto al ataque de la amina. Inspirado por un trabajo de los años setenta, utilizó ácido acético como catalizador, en vez de una base. La combinación de calor y medio ácido aceleró el cierre del anillo, sin provocar la mezcla de bis-péptidos que resultaba de la combinación de calor y medio básico.

Nos llevó seis meses más encontrar una buena combinación de éster, grupo protector, disolvente y temperatura. (Volveremos sobre esta cuestión en el futuro ya que la receta actual no

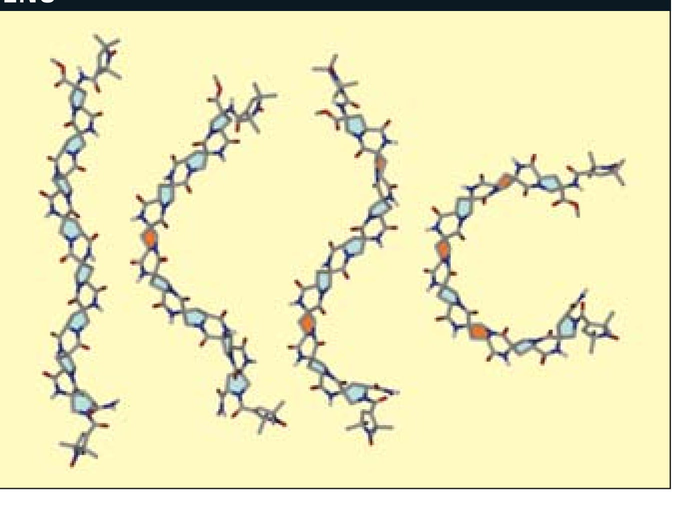
MELISSA THOMAS

COMO SE OBTIENEN LOS BIS-PEPTIDOS

La síntesis de un bis-péptido empieza con el ensamblaje, en el orden correcto, de los bis-aminoácidos seleccionados. A continuación, se rigidifica la estructura. De una bolita de resina polimérica con un grupo amina protegido se elimina el grupo protector (*amarillo*); el primer bis-aminoácido se une a la bolita a través de su ácido carboxílico libre (*1*). Se repite el proceso (*2* y *3*) con más bis-aminoácidos: se obtiene una cadena unida mediante enlaces sencillos. Se eliminan la bolita de resina y los grupos protectores (*verde*) de las aminas no enlazadas (*4*). Las aminas libres reaccionan con los ácidos carboxílicos protegidos vecinos; ello provoca la remoción de los grupos enmascaradores y la formación de un segundo enlace entre cada par de monómeros adyacentes (*5*).



FORMAS DE DISEÑO



Estos ejemplos de bis-péptidos sintetizados en la Universidad de Pittsburgh muestran la variedad de formas que se obtienen según los monómeros que se inserten: de cilindros casi rectos a formas en cuarto creciente.

CHRISTIAN E. SCHAFMEISTER

funciona para secuencias más largas de cinco monómeros.) Por ahora, nos proponemos desarrollar algunas aplicaciones con los bis-péptidos disponibles: los de cualquier longitud que incluyen sólo monómeros de pro4 y las secuencias de hasta cinco monómeros que incluyen el resto.

Aplicaciones

Una de las primeras aplicaciones de los bis-péptidos correspondería a una macromolécula que se uniera fuertemente a la toxina del cólera (Ctx). Esta proteína posee cinco cavidades idénticas, cada una alojada en el vértice de un pentágono. Mediante esas cavidades, la Ctx se une al azúcar GM1, que encaja en ellas a la perfección. Las células epiteliales que recubren el intestino delgado cuentan con moléculas de GM1 unidas a su superficie; cuando Ctx se une a cinco de estas moléculas, se desencadena una serie de acontecimientos que conduce a la enfermedad del cólera. Las moléculas que se anclaran con fuerza a las cavidades de Ctx evitarían que ésta se uniera a las células humanas y detendrían la enfermedad en sus comienzos.

Otros investigadores han desarrollado azúcares de tamaño limitado que se unen a estas cavidades. Sin embargo, no tendrían aplicación farmacológica: su unión a Ctx no es fuerte, con lo que no pueden competir con las cinco interacciones simultáneas que la toxina establece con GM1 en las células humanas. Nos preguntamos si podríamos sintetizar un bis-péptido que taponara dos cavidades de Ctx al mismo tiempo. Para ello, unimos un azúcar pequeño a cada extremo de bis-péptidos cilíndricos que cubrían la distancia entre cavidades adyacentes en la proteína Ctx. El experimento funcionó: los bis-péptidos con dos azúcares se unían a Ctx; lo hacían con mayor fuerza que los azúcares pequeños individuales y, al menos, tan bien como la diana natural GM1.

Sin embargo, no sabemos si cada bis-péptido se une a dos cavidades de una sola Ctx o a cavidades de dos moléculas de Ctx, creando así una red de toxinas. Si el bis-péptido opera mediante el entrecruzamiento de proteínas Ctx, su eficacia en la lucha contra el cólera sería limitada, pues funcionaría sólo en los individuos que ya tuvieran una concentración elevada de Ctx en su organismo (probablemente una dosis letal). (Si la concentración de Ctx fuera demasiado baja, cada bis-péptido podría unirse a una cavidad de una Ctx, pero la probabilidad de encontrar otra Ctx para crear el entrecruzamiento sería muy pequeña.) El entrecruzamiento de proteínas sí resultaría eficaz, en cambio, en la superficie de los virus, por lo que ahora estamos aplicando esta hipótesis a la inhibición de virus (VIH y Ebola, entre otros).

Además de añadir grupos a los extremos de un cilindro rígido, hemos desarrollado accionadores moleculares; en éstos hay dos cilindros unidos por una suerte de bisagra. Un accionador es un dispositivo que responde a una señal mediante la producción de movimiento. En condiciones normales, nuestros accionadores de tipo cilindro-bisagra-cilindro se hallan abiertos; para plegarse o cerrarse necesitan que los grupos situados en los extremos de los cilindros se unan a un metal o a una molécula de tamaño moderado. Laura Belasco, estudiante del laboratorio, preparó una primera versión, acorde con la cual los cilindros constan de cuatro bloques de construcción y la bisagra es un aminoácido común; la apertura y el cierre se provocan con un metal.

Ese nanodispositivo se aplicaría a la construcción de válvulas moleculares. Una válvula constaría de un orificio nanoscópico rodeado de cilindros con bisagras unidos a su borde. Extendidos, los cilindros bloquearían el orificio; plegados, lo abrirían. Las válvulas se utilizarían para la fabricación de dispositivos que detectaran el estado de un paciente y respondieran con el suministro del medicamento apropiado.

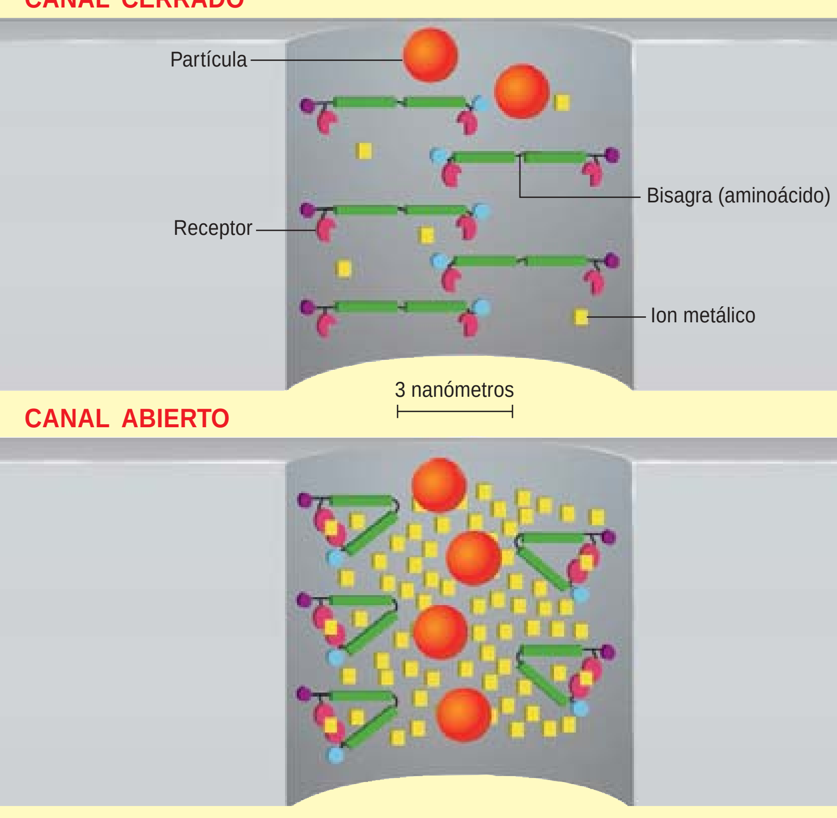
El control de la apertura y el cierre se llevaría a cabo electrónicamente. Mediante grupos alojados al final de los cilindros, que se unirían en presencia de cierta carga eléctrica. Este sistema de control individual permitiría fabricar dispositivos de almacenamiento de memoria a partir de un bosque de cilindros con bisagras. Las puntas de los microscopios de fuerza atómica barrerían el bosque para detectar qué cilindros se hallan en posición 1 y 0, de forma análoga a la detección de huecos o no huecos mediante el dispositivo Milpiés de IBM [*véase* "Nanounidades de memoria", por Peter Vettiger y Gerd Binning; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2003]. Borrar un hueco, tarea difícil para el Milpiés, sería tan sencillo como invertir el estado del cilindro con bisagra.

Las cadenas laterales de los 20 aminoácidos que utilizan los organismos para construir sus proteínas están adornadas con una amplia variedad de grupos químicos. Las proteínas disponen dichos grupos en configuraciones cuya forma y demás propiedades sirven para catalizar reacciones, enlazar entre sí pequeñas moléculas y ejecutar múltiples funciones.

En nuestro laboratorio estamos desarrollando bloques de construcción que alojan un grupo químico adicional; con ellos fabricaremos bis-péptidos con grupos químicos distribuidos en forma de escalera a lo largo del esqueleto. Hemos logrado

NANOVALVULAS

En la figura se representan válvulas de tres nanómetros de diámetro que se abren mediante accionadores basados en un bis-péptido. Estos accionadores (cuyo funcionamiento ya se ha comprobado) constan de dos cortos cilindros de bis-péptido (*verde*), unidos por medio de un aminoácido que opera a modo de bisagra. A bajas concentraciones del ion metálico que desencadena el proceso (*amarillo*), los accionadores se colocan sobre los bordes de pequeños orificios grabados sobre una lámina de aluminio (*gris*); de este modo, bloquean el paso de partículas o moléculas de mayor tamaño (*naranja*, *arriba*). A concentraciones elevadas, los iones se fijan sobre los receptores (*rojo*); ello fuerza el plegamiento de los accionadores, que provoca la apertura del canal (*abajo*).



MELISSA THOMAS

ya el primer bloque de construcción con un grupo lateral. Si conseguimos fabricar macromoléculas con una constelación de grupos químicos que remede el centro activo enzimático (la zona donde tiene lugar la catálisis), habremos dado un paso adelante en el camino de la creación de enzimas de diseño.

En los próximos veinte años preveo un auge en este campo de investigación. Se multiplicarán los grupos dedicados al diseño de moléculas basadas en bis-péptidos y a la síntesis de enzimas artificiales y otros dispositivos moleculares de interés. En la actualidad, la síntesis de algunos fármacos anticancerígenos (la halicondrina B y la briostatina, por ejemplo) resulta muy cara. Las esponjas y otros organismos marinos que producen esos compuestos no pueden suministrar las cantidades que se necesitan para el uso generalizado de los mismos. En 20 años podríamos desarrollar métodos de síntesis de enzimas artificiales para obtener estos y otros compuestos de una forma respetuosa con el medio. Imagínese lo que supondría agregar a un barril de jarabe de maíz rico en fructosa una gota de enzima artificial y cosechar días después varios litros de briostatina.

El desarrollo de enzimas artificiales que rompieran la celulosa en azúcares —para destilar luego etanol— o que aprovecharan la energía lumínica para combinar agua y dióxido de carbono y formar etanol supondría importantes beneficios para la sociedad. Asimismo, se diseñarían enzimas que sintetizarían bloques de construcción basados en bis-aminoácidos y los unirían entre sí, haciendo mucho más sencilla la síntesis de bis-péptidos.

De la combinación de la química con la informática hemos obtenido macromoléculas con forma programable. Puesto que la producción de bis-péptidos requiere sólo unos días, el diseño, el ensamblaje, el estudio de sus propiedades y el modelado de la generación siguiente pueden resolverse en cuestión de semanas. Para los años venideros se nos plantea un reto fascinante: a partir de una función determinada, diseñar la mejor secuencia bis-peptídica que la lleve a cabo.

El autor

Christian E. Schafmeister enseña química en la Universidad de Pittsburgh. Centra su investigación en la síntesis programable de moléculas. Obtuvo el doctorado en biofísica en la Universidad de California en San Francisco. Durante su estancia posdoctoral en la Universidad de Harvard, desarrolló un método para la síntesis de péptidos resistentes a las proteasas y, por tanto, con aplicaciones farmacológicas.

Bibliografía complementaria

CONSTRUCTING A MOLECULAR LEGO SET. John P. Mathias y J. Fraser Stoddart en *Chemical Society Reviews*, vol. 21, n.º 4, págs. 215-225; 1992.

FOLDAMERS: A MANIFESTO. S. H. Gellman en *Accounts of Chemical Research*, vol. 31, n.º 4, págs. 173-180, abril de 1998.

A FIELD GUIDE TO FOLDAMERS. D. J. Hill, M. J. Mio, R. B. Prince, T. S. Hughes y J. S. Moore en *Chemical Reviews*, vol. 101, n.º 12, págs. 3893-4011; diciembre de 2001.

FLEXIBILITY AND LENGTHS OF BIS-PEPTIDE NANOSTRUCTURES BY ELECTRON SPIN RESONANCE. S. Pornsuwan, G. Bird, C. E. Schafmeister y S. Saxena en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 128, n.º 12, págs. 3876-3877; 29 de marzo de 2006.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Escudos magnéticos

El futuro Reactor Termonuclear Experimental Internacional y los cinturones de Van Allen en la alta atmósfera confinan entre campos magnéticos las partículas cargadas

Cada segundo, sobre nuestro planeta se abalanzan a gran velocidad miles de millones de partículas; afortunadamente, un escudo, no material, sino magnético, nos protege del bombardeo. En la Tierra, miles de millones de partículas, de muy alta energía también, constituyen los plasmas, a 300 millones de grados, de los reactores de fusión controlada; esos plasmas, que destruirían cualquier obstáculo material, se mantienen, a su vez, confinados gracias a un escudo magnético.

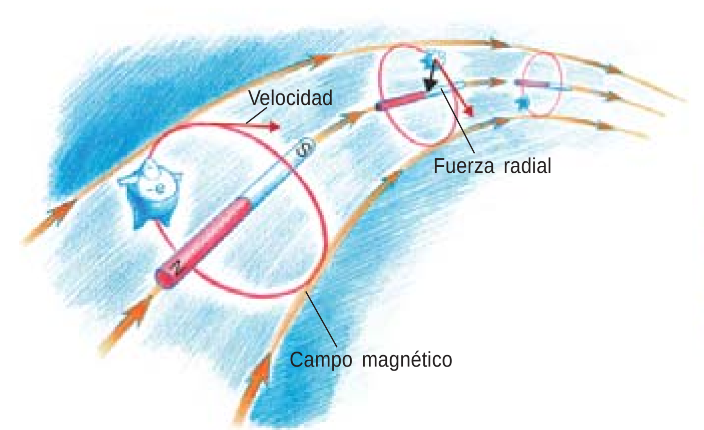
Los cinturones de Van Hallen

El campo magnético terrestre desvía y canaliza los electrones, protones y demás partículas rápidas procedentes del espacio. Sin esa protección frente a los rayos cósmicos, no habría vida en la Tierra. Así, una enorme cantidad de cargas está encerrada dentro de las bandas de Van Allen, unas vastas zonas en forma de rosquilla situadas a muchos radios terrestres de la Tierra, a la altura del ecuador. Dentro de esas zonas, las partículas se distribuyen de diferentes maneras en función de sus energías, de su masa y de sus cargas, pero todas ejecutan movimientos similares.

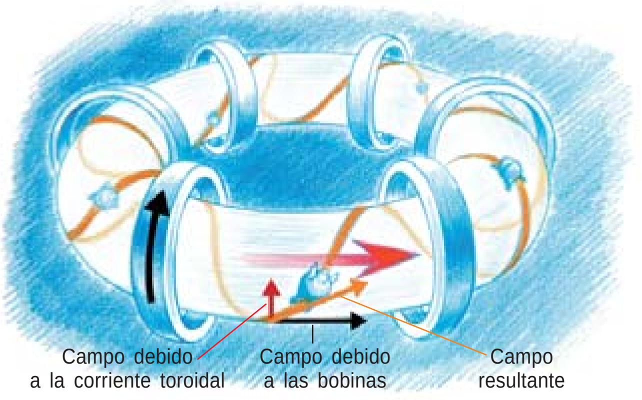
Analicemos la trayectoria de un electrón que se mueve a 30.000 kilómetros por segundo. Su movimiento, complejo en apariencia, se descompone en tres movimientos efectuados a ritmos diferentes. En una fracción de milisegundo el electrón describe un círculo de medio kilómetro de radio. El centro de ese círculo completa cada seis segundos una ida y vuelta entre el polo norte y el polo sur. Por último, el arco sobre el que el electrón ejecuta su movimiento de vaivén se desplaza hacia el este y en tres días da una vuelta a la Tierra.

El movimiento circular rápido del electrón se debe al campo magnético terrestre, que ejerce sobre la partícula una fuerza proporcional tanto a su intensidad como a la carga y a la velocidad del electrón. Esa fuerza, perpendicular al campo magnético y a la velocidad del electrón, curva la trayectoria tanto más cuanto más intenso sea el campo magnético.

Si la velocidad inicial es perpendicular al campo magnético, el electrón describe un círculo: a una altitud de 32.000 kilómetros (algo más de cinco radios terrestres), donde el campo magnético terrestre no vale más que 10^{-7} tesla, un electrón que se mueva a 30.000 kilómetros por segundo recorrerá un círculo de medio kilómetro de radio. En cambio, en el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER), ese gran *tokamak* que debe construirse en Francia, el campo magnético es hiperintenso, del orden de cinco teslas, ya que debe confinar el plasma en un volumen de algunos metros cúbicos solamente. Las energías de las partículas del plasma resultan equiparables a las del electrón de origen cósmico citado antes como ejemplo, que en ese campo magnético describiría círculos de unos 50 micrometros de radio.



1. Un campo magnético provoca la rotación de un electrón a su alrededor. El lazo de corriente así creado es equiparable a un pequeño imán que girase a lo largo de las líneas del campo (*indicado por las flechas naranja*).



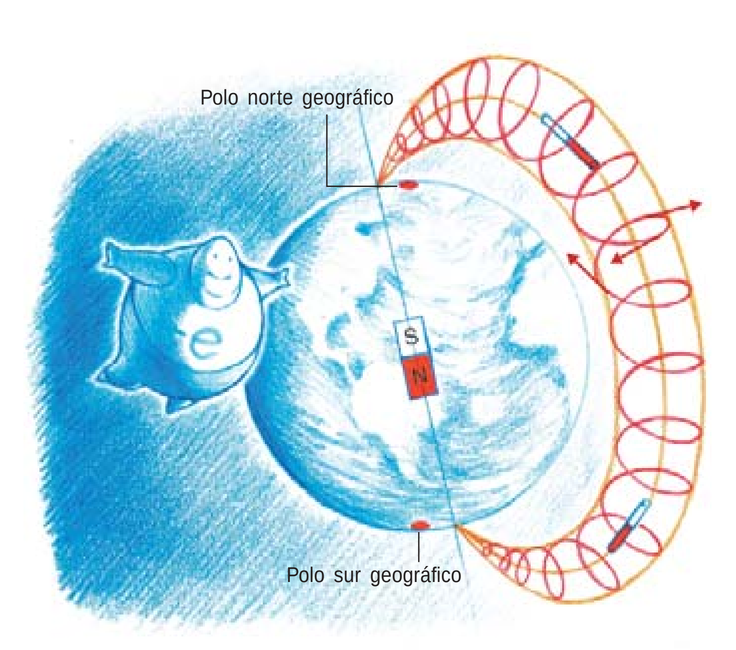
2. En un *tokamak* (acrónimo de "cámara toroidal con bobinas magnéticas" en ruso), o en el ITER, las partículas magnéticas quedan confinadas en un toro. Se mueven arrollándose en torno a las líneas helicoidales del campo magnético, lo que anula la deriva que sufren.

BRUNO VACARO/*PLS*

El campo magnético sólo confina las partículas cargadas en un plano perpendicular a su dirección. Si el campo es uniforme, la partícula puede escapar en la dirección del campo. No es ése el caso de las partículas atrapadas en las bandas de Van Allen, pues el campo magnético terrestre, parecido al de un imán, no es uniforme.

Un buen procedimiento para analizar el comportamiento del electrón en el campo terrestre consiste en representarlo por su imán equivalente. La corriente, debida al movimiento electrónico circular, crea un electroimán natural, que asimilaremos a una pequeña barra imanada paralela al campo. El sentido de la rotación del electrón en su círculo determina la orientación norte-sur del imán. Al revés que en una brújula, su polo sur apunta hacia el polo sur magnético de la Tierra, o sea, hacia el polo norte geográfico.

El movimiento en el campo magnético terrestre de nuestro electrón representativo es entonces fácil de describir. El imán equivalente al círculo electrónico permanece siempre paralelo al campo magnético terrestre. Como un anillo a lo largo de un hilo, sigue las líneas del campo. Ahora bien, las de la Tierra salen del polo sur magnético (polo norte geográfico) y se curvan para volver a converger hacia el polo norte magnético. Cuando el electrón llega al polo norte geográfico, el polo sur de su imán equivalente y el polo sur del imán terrestre se enfrentan y, por tanto, se repelen. El electrón desanda el camino hasta el otro polo, donde se reproduce el mismo fenómeno. Es así como ejecuta sus viajes de ida y vuelta entre los polos moviéndose por los planos meridianos, donde yacen las líneas del campo.



3. Las líneas del campo magnético terrestre que salen del polo norte y convergen en el polo sur canalizan los electrones. El electrón, equivalente a una barrita imanada, es repelido por el imán terrestre cada vez que llega a un polo.

BRUNO VACARO/PLS

Deriva magnética

En general, el punto de retroceso se encuentra a muy gran altitud (del orden de 300 kilómetros) y los electrones apenas interactúan con moléculas y iones atmosféricos. Cuando las anomalías del campo magnético terrestre hacen que esa altitud disminuya, electrones muy energéticos se topan con los iones y las moléculas de la alta atmósfera y les ceden energía. Esa energía se reemite en forma luminosa: se produce una aurora boreal.

Tal efecto de espejo magnético confina las partículas nacidas de los rayos cósmicos en la tercera dimensión. Basándose en el mismo principio, se concibieron reactores de fusión controlada cuyo plasma estaba confinado entre los polos de un entrehierro gigantesco. Esa configuración ha sido abandonada por otra cuyas líneas de campo se refuerzan a sí mismas. Creadas por una bobinado tórico, las líneas del campo son círculos en torno a un mismo eje; sobre ellas se arrollan las partículas. Esta es la solución elegida en los *tokamak*, y en el ITER en particular.

Sin embargo, las partículas derivan de una línea de campo a otra, lo cual las hace salir del toro que forma el reactor. El mismo fenómeno se produce en el campo magnético terrestre, que disminuye con la altitud. Durante su movimiento casi circular, el electrón se acerca y se aleja de la Tierra. Cuando se encuentra más cerca de la Tierra (se dirige entonces hacia el oeste), el campo magnético un poco más intenso curva más su trayectoria. Cuando está más alejado (dirigiéndose entonces hacia el este), el campo más débil la curva menos. Ese efecto mínimo desplaza el electrón, en sentido este, de una línea de campo a otra. A la deriva contribuye un segundo fenómeno: la fuerza centrífuga inducida por la curvatura de las líneas de campo que sigue el electrón entre los polos.

El efecto combinado de la fuerza centrífuga y el campo magnético genera una deriva al este, que induce una corriente eléctrica alrededor de la Tierra. El campo magnético creado por esa corriente es muy inestable: cuando desciende, arrastra consigo, como hemos visto, las partículas cargadas, lo que genera auroras boreales y perturba las telecomunicaciones.

En los *tokamak* y con líneas de campo tóricas, la deriva, dirigida según el eje del toro (por ejemplo, hacia arriba), llegaría a varios metros por segundo, lo que impide el confinamiento. Esa es la causa de que a las líneas de campo se les dé forma de hélices arrolladas sobre toros. Cuando las partículas se hallan en la parte superior de un toro, la deriva las arrastra hacia un toro mayor. El movimiento espiral las lleva a la parte inferior de ese toro, donde la deriva las hace subir de nuevo hacia su toro inicial. La forma helicoidal de las líneas de campo anula entonces los efectos acumulados de la deriva. Un campo helicoidal tórico se obtiene con bobinas suplementarias que inducen una corriente en el seno del plasma.

Juan M.R. Parrondo

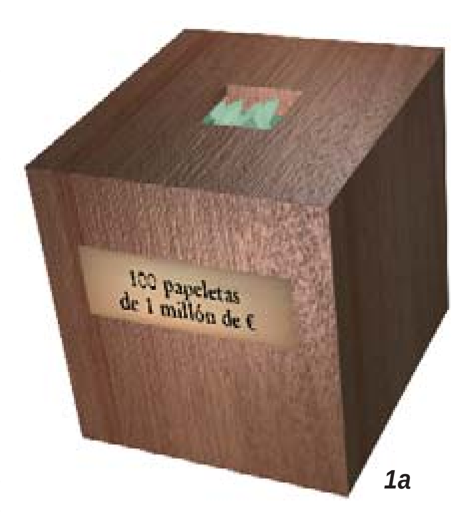
Loterías y decisiones

Observe la figura 1. En ella hay dos urnas. La de la izquierda contiene 100 papeletas, todas y cada una de ellas con un premio de un millón de euros. La de la derecha contiene también 100 papeletas: 89 con un premio de un millón de euros, una papeleta sin ningún premio y 10 papeletas con un premio de 5 millones de euros. Usted tiene que elegir una de las dos urnas y sacar una papeleta de la urna seleccionada. El premio que contenga la papeleta será suyo ¿Cuál de las dos urnas elegiría? ¿Prefiere el millón de euros de la urna de la izquierda (1*a*) o se atreve con la de la derecha (1*b*), en la que puede ganar hasta 5 millones a costa de la posibilidad, poco probable, de irse a casa con las manos vacías?

Observe ahora la figura 2. Tiene que elegir de nuevo entre dos urnas con 100 papeletas cada una. La de la izquierda, 2*a*, tiene 89 papeletas sin premio y 11 papeletas con un millón de euros. La de la derecha, 2*b*, tiene 90 papeletas sin premio y 10 papeletas con 5 millones de euros. ¿Cuál es en este caso su elección?

Prácticamente todo el mundo prefiere en el segundo caso la urna 2*b*. En el primero, es 1*a* la urna elegida mayoritariamente, aunque una minoría apreciable asume el pequeño riesgo de la papeleta sin premio y elige 1*b*. Si usted ha elegido 1*a* y 2*b*, entonces coincide con la mayoría de la gente, pero ha contravenido uno de los axiomas básicos de la teoría de la utilidad, una teoría que trata de cuantificar las preferencias de las personas ante situaciones inciertas.

El axioma que ha contravenido es el llamado axioma de independencia, que a primera vista parece bastante razonable. El axioma dice que, si prefiero una lotería *a* a una *b* y realizo sobre ambas una modificación idéntica, entonces la preferencia no debe cambiar, es decir, seguiré prefiriendo *a* sobre *b*. ¿Qué entendemos por una modificación idéntica? En





1. ¿Cuál de las dos urnas prefiere?

nuestro ejemplo, significa añadir o quitar papeletas iguales de las dos urnas. En otras palabras, el axioma de indiferencia, en una formulación simplificada y adaptada a las urnas de las figuras, dice: si añadimos o retiramos de cada una de las dos urnas papeletas con el mismo premio, entonces el orden de preferencia no debe cambiar. ¿Les parece razonable? No debería ser así si han elegido 1*a* y 2*b*, porque esa elección está en franca contradicción con el axioma.

En efecto, tomen las dos urnas de la figura 1, retiren de las dos 89 papeletas con un millón de euros y reemplácenlas por 89 papeletas con 0 euros. El resultado son las dos urnas de la figura 2. Por lo tanto, si el axioma fuera cierto, usted debería haber mantenido la preferencia después del reemplazo de papeletas y haber elegido en las dos figuras las urnas de la izquierda o las de la derecha, pero nunca la 1*a* y la 2*b*.

Esta contradicción entre la elección de la mayoría de la gente y el axioma de indiferencia se llama paradoja de Allais, en honor del economista francés y premio Nobel Maurice Allais. No se trata en realidad de una paradoja, sino de una forma de probar que el axioma de independencia no reproduce adecuadamente nuestra valoración del riesgo.

Veamos en qué momento la preferencia entre las dos urnas cambia. Cuando retiramos las 89 papeletas con premio de un millón, nos quedamos con 11 de un millón en la urna de la izquierda y 1 de cero euros y 10 de 5 millones en la de la derecha. Creo que la mayor parte de la gente que elige 1*a* mantendría su decisión tras este cambio. A continuación, añadimos, una a una, 89 papeletas sin premio. Tendremos primero 11 papeletas con un millón y una papeleta con cero euros en la izquierda y 10 papeletas con 5 millones y 2 con cero euros en la derecha. ¿Cambiaría entonces su preferencia hacia la urna de la derecha? ¿Y después de añadir diez papeletas sin premio? ¿Puede precisar en qué momento cambia su decisión?

El axioma de independencia no es sólo razonable, sino que también es compatible con criterios matemáticos de decisión muy generales. Uno de estos criterios consiste en comparar los valores medios de la ganancia en cada una de las dos loterías. Este es de hecho el criterio adecuado si uno va a jugar un gran número de veces

al mismo sorteo. En la paradoja de Allais, el valor medio de la ganancia en la urna 1*a* es de un millón de euros; en la 1*b* es $(89 \times 1 + 10 \times \times 5)/100 = 1{,}39$ millones; en la 2*a* es $11 \times 1/100 = 0{,}11$ millones, y en la 2*b* el valor medio de la ganancia es $10 \times \times 5/100 = 0{,}5$ millones. Por lo tanto, el criterio del valor medio prescribe que 1*b* es mejor que 1*a* y que 2*b* es mejor que 2*a*.

Se puede demostrar que el criterio del valor medio verifica el axioma de independencia. De hecho, cualquier criterio basado en un valor medio lo verifica y es incompatible con la elección habitual en la paradoja: el par 1*a*, 2*b*. Supongamos que $U(p)$ es el beneficio o utilidad asociada a un premio *p*. Para que la elección sea el par 1*a*, 2*b*, tiene que verificarse:

$$100 \times U(1)/100 > 1 \times U(0) + 89 \times \times U(1) + 10 \times U(5)/100$$

$$89 \times U(0) + 11 \times U(1)/ /100 < 90 \times U(0) + 10 \times U(5)/100$$

Pero estas dos desigualdades son incompatibles: si en la primera sumamos a ambos miembros $89 \times U(0)/100$ y restamos $89 \times U(1)$, obtenemos la segunda invertida. Estas sumas y restas no son más que la reproducción en lenguaje matemático de la operación de añadir o retirar papeletas de las urnas.

El mes pasado hablábamos de la paradoja de San Petersburgo y de cómo la solución que dio Bernoulli fue el comienzo de la teoría de la utilidad, a finales del siglo XVIII. En 1944, Von Neumann y Morgenstern desarrollaron una teoría axiomática en la que se incluía el axioma de independencia. La propuesta de Bernoulli que analizamos el mes pasado, en la que se utilizaba una función de utilidad $U(p)$ concreta, el logaritmo, también es incompatible con las preferencias habituales en la paradoja de Allais. Sin embargo, el propio Allais se considera un seguidor de Bernoulli, y a Von Neumann y Morgenstern, "neo-bernoullianos" que se han desviado de la idea original del científico suizo. Para Allais, esa idea original consistía en asignar un valor psicológico a cada premio, que puede depender no sólo de su cuantía, sino también de su probabilidad (y que por supuesto puede ser distinto de un individuo a otro, dependiendo de su patrimonio, personalidad, etc.).

Paradoja de Ellsberg

Otra conocida paradoja relacionada es la de Ellsberg, en la que de nuevo tenemos que elegir entre varios sorteos. En una urna hay 90 bolas: 30 son rojas y el resto, 60, son negras o amarillas. Usted no sabe cuántas bolas negras y amarillas hay, tal y como se representa en la figura 3. Ahora tiene que elegir una de las siguientes opciones: 1.a) Si saca una bola roja le doy 100 euros; 1.b) Si saca una bola amarilla le doy 100 euros.

Tómese su tiempo. ¿Ha elegido ya? Si es así, considere esta nueva propuesta: 2.a) Si saca una bola roja o negra le doy 100 euros; 2.b) Si saca una bola amarilla o negra le doy 100 euros.



3. La paradoja de Ellsberg.

La mayor parte de la gente elige la opción 1.a) en el primer caso y la 2.b) en el segundo, pero esta elección contiene una contradicción. Eligiendo 1.a) estamos suponiendo implícitamente que hay más bolas rojas que amarillas, mientras que la elección de 2.b) significa que creemos que hay más amarillas que rojas. Podríamos pensar que la gente considera que 1.a) y 1.b) son prácticamente equivalentes, y que también lo son 2.a) y 2.b). Al fin y al cabo, lo serían si hubiera 30 bolas negras y 30 amarillas. Sin embargo, cuando se pregunta a los sujetos de estudio, no muestran indiferencia ante las dos opciones o una preferencia débil hacia una de ellas, sino que la preferencia es bastante intensa.

Lo que ocurre en la paradoja de Ellsberg es que la gente se ve atraída por la "tranquilidad" que proporciona un conocimiento completo de la situación. En el primer caso sabemos que, eligiendo a), tenemos una probabilidad del 30 % de ganar 100 euros, mientras que la opción b) es incierta y con ella no podemos ni siquiera evaluar las probabilidades de ganar. En el segundo caso pasa lo mismo: sabemos seguro que con la opción b) la probabilidad de ganar es del 60 %, mientras que no podemos evaluar esa probabilidad para la opción a). La paradoja de Ellsberg muestra otro rasgo interesante de nuestra relación con el riesgo: tratamos de evitar la ignorancia o, a la hora de evaluar sus consecuencias, tendemos a "ponernos en lo peor".





2. ¿Cuál de las dos urnas prefiere?

IDEAS APLICADAS

Mark Fischetti

RADIO POR SATELITE

Música en haces

La radio por satélite consigue que a cualquier rincón del país lleguen los mismos 100 canales de música, reportajes y deportes. Sin embargo, alguien cercano a usted puede que reciba otro grupo de canales, y una tercera persona que no esté abonada no recibirá nada. ¿Cómo puede un servicio tan ubicuo discriminar tan finamente?

Tres compañías ofrecen la radio por satélite del planeta: XM Satellite Radio y Sirius Satellite Radio para EE.UU., y WorldSpace para Africa, Asia y Europa. XM emplea dos satélites geoestacionarios y unos 800 repetidores terrestres de baja potencia repartidos en torno a las poblaciones con estructuras de altura que obstaculizan la línea de visión de los satélites. Sirius cuenta con tres satélites que describen órbitas elípticas muy inclinadas y unos 100 repetidores de gran potencia; cada repetidor cubre un área metropolitana. Ambas arquitecturas proporcionan un servicio de la misma fiabilidad, asegura Dan Goebel, investigador del Laboratorio de Propulsión a Chorro en Pasadena (California), que ya había diseñado amplificadores para repetidores terrestres.

En la opinión de Goebel, el receptor del usuario constituye la parte más innovadora del sistema. Sea el receptor portátil o de automóvil, su antena recibe señales procedentes de todos los satélites y repetidores de la compañía. Los procesadores internos muestrean las señales y reproducen la de mayor intensidad, cualquiera que sea, cambiando de una a otra según sea necesario.

Según Terry Smith, vicepresidente de tecnología de Sirius, la clave para conseguir cobertura en cualquier lugar y en todo momento reside en tres tipos de diversidad. La diversidad espacial asegura que un satélite o un repetidor llegue a un oyente si otro no puede. Satélites y repetidores transmiten a longitudes de onda ligeramente distintas, lo que ofrece una diversidad de frecuencias entre las que el receptor elige. Y las señales se envían con leves retardos, para crear una diversidad temporal —solapamiento que cubre las interrupciones fugaces.

Los receptores captan todos los canales que emite una compañía, pero en dos viviendas contiguas se escucharán sólo los canales que consten en cada abono. Al suscribirse, el satélite envía el código de activación correspondiente al número de abono. Ese código ordena al receptor el bloqueo de los canales no contratados por el abonado. Un vecino no podrá escuchar mediante un receptor genérico porque éste carece del número de abono adecuado.

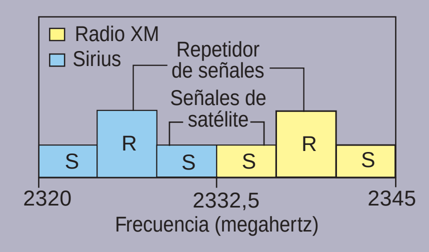
Satélite XM

LOS REPETIDORES reenvían las señales procedentes de un satélite. En el sistema de radio XM las zonas urbanas están cubiertas por una red de pequeños repetidores, repartidos de modo que salvan los obstáculos; cada uno proporciona una radioseñal de 50 a 100 watt. Los sistemas de radio Sirius suelen emplear un único repetidor, mayor, que cubre toda una población con 400 a 2000 watt.

Receptor portátil

Repetidor XM

EL RECEPTOR muestrea continuamente las señales de los satélites y los repetidores a su alcance; en cada instante reproduce la señal de mayor intensidad.



LAS FRECUENCIAS DE ENLACE DE BAJADA ("downlink") que emiten los transpondedores de los satélites XM y Sirius se encuentran en la banda S. Cada satélite despliega sus 100 canales a lo largo de 1000 frecuencias dentro de sendos espectros de cuatro megahertz, uno en cada extremo del intervalo asignado a la compañía; los repetidores emplean los cuatro megahertz centrales. Mediante técnicas de expansión de espectro, los receptores recombinan las frecuencias en canales. WorldSpace transmite en la banda S entre 1467 y 1492 megahertz.

LOS SATELITES GEOESTACIONARIOS, fijos sobre el ecuador, transmiten por todos los canales de radio XM. Sus haces inciden sobre el territorio estadounidense bajo 30 a 40 grados respecto al horizonte. La radio Sirius emplea tres satélites en órbitas elípticas muy inclinadas, con un "ángulo de visión" superior a 60 grados. Cada satélite describe una traza en tierra en forma de ocho (*línea discontinua*). Permanecen sobre Norteamérica unas 16 horas, de tal modo que siempre hay dos transmitiendo. WorldSpace posee dos satélites geoestacionarios que proyectan cuatro haces trazadores de alta ganancia fuertemente concentrados; cada uno porta un conjunto de canales distinto para los países que cubre.

MATT VINCENT (*panel superior*); JEN CHRISTIANSEN (*panel inferior*); NASA/THE VISIBLE EARTH (*mapa*)

➤ **COMPRESION:** Valiéndose de menos bits de información para describir el sonido que porta un canal, las radioemisoras encajan mayor número de canales (o mejoran la calidad de audio) en su tramo de espectro sin alterar los receptores de los clientes. Cuando XM y Sirius entraron en servicio, hace unos cinco años, ofrecían unos 60 canales. La mejora de los métodos de compresión de señales que viajan de los estudios de radio hasta los satélites ha elevado esa cifra a más de 100, incluyendo información sobre el tráfico local. La industria sigue investigando el modo en que el sistema auditivo y el cerebro humanos perciben los patrones de sonido, para idear algoritmos de compresión que ahorren más espacio.

➤ **FLOTANDO:** Los estudios de Sirius están en el piso 36 de un rascacielos de Manhattan. El hormigón del suelo se vertió sobre una cámara de aire de caucho que se infló luego para aislar la losa de las vigas del edificio. Ese colchón amortigua las vibraciones del tráfico pesado, de los martillos neumáticos y demás ruidos urbanos que se infiltrarían en la señal del enlace de subida al satélite ("uplink"). Además, el ruido consume bits de señal, pero es de compresión difícil debido a su naturaleza aleatoria.

➤ **IONIZACION:** Los radiosatélites y numerosos satélites de televisión se mantienen estables en su órbita (contra las atracciones del Sol y de la Luna) merced a haces iónicos que se activan hasta una hora dos veces diarias. Son ya más de 30 los satélites que emplean esa técnica. Según Dan Goebel, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, los haces iónicos reducen por un factor de 10, respecto a los sistemas de propulsión química común, el combustible que debe ponerse en órbita.

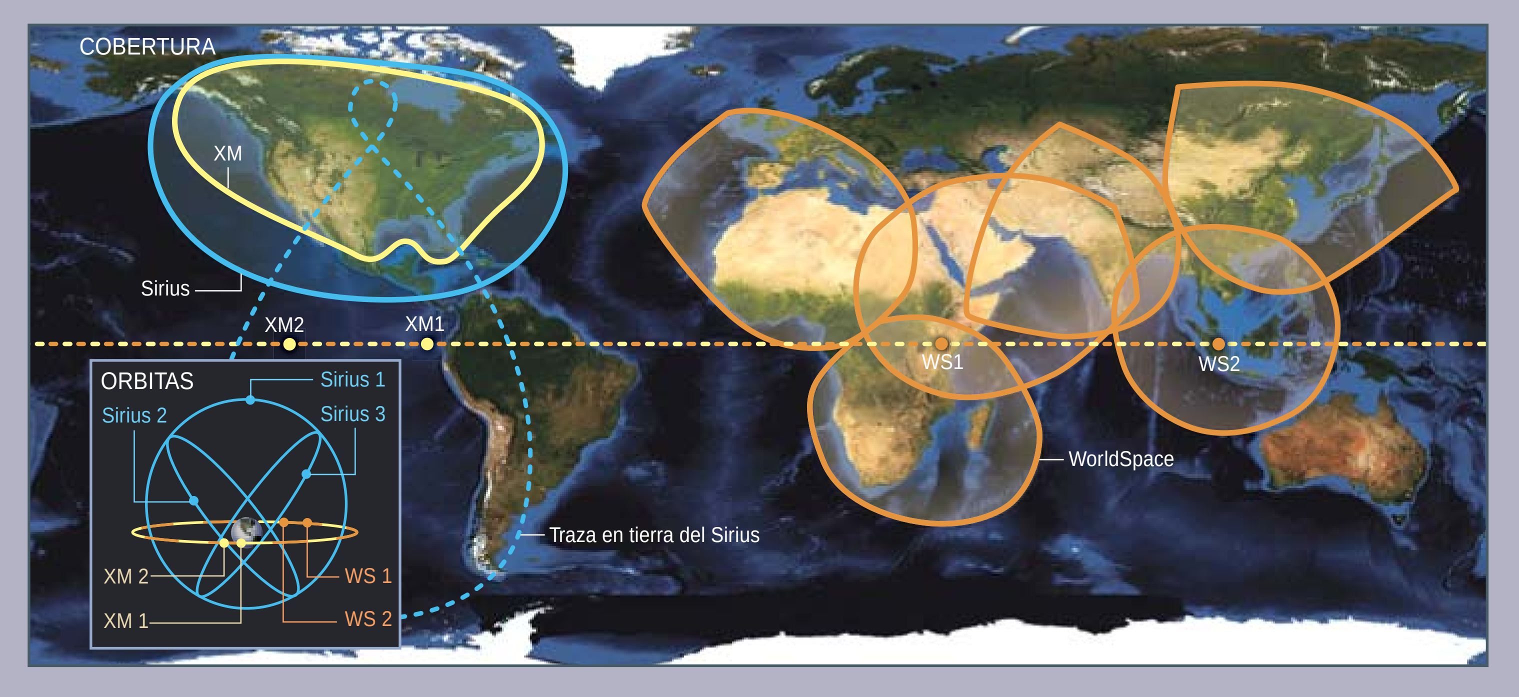
Repetidor Sirius

Satélite Sirius

Repetidor XM

EL RECEPTOR tampona la programación cuatro segundos y la reproduce con retraso; con ello evita que el cliente perciba una interrupción al atravesar pasos elevados u otros obstáculos.

Automóvil con receptor



LIBROS

Ciencia y poder

Oppenheimer

REAPPRAISING OPPENHEIMER. CENTENIAL STUDIES AND REFLECTIONS. Dirigido por Cathryn Carson y David A. Hollinger. Office for History of Science and Technology; Berkeley, 2005.

J. ROBERT OPPENHEIMER. A LIFE, por Abraham Pais. Oxford University Press; Oxford, 2006.

OPPENHEIMER. THE TRAGIC INTELLECT, por Charles Thorpe. The University of Chicago Press; Chicago, 2006.

Situado en el epicentro del siglo XX, Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) encarnó la figura del científico existencialista en un mundo atenazado entre el Escila del socialismo y el Caribdis del fascismo. Comprometido con su patria, pero no hasta el punto de anteponerla a un idealismo de solidaridad universal, con un conflicto de identidad personal añadido. El científico ciclotímico que quizá haya tenido más poder en la historia y, por ende, el que mayor odio desató. Pese a esa individualidad tan atractiva en sus dudas hamletianas, carecemos de un retrato psicológico riguroso. No son los norteamericanos dados a la historia caracterológica tan arraigada en Europa. Y aunque comienzan a menudear los trabajos sobre su vida y obra, el enfoque suele ser predominantemente externalista, como muestran los que traemos a colación.

¿Cuál era el nivel de la física norteamericana en el primer tercio del siglo XX? Las universidades impulsaban la aplicación de los conocimientos. Los estudios teóricos iban muy rezagados con respecto a la investigación experimental. Y un físico teórico norteamericano se encontraba en aplastante desventaja con otro europeo. La atmósfera comenzó a cambiar con el viaje que en 1921 Einstein realizó a los Estados Unidos, donde el Instituto de Princeton le concedió el doctorado *honoris causa* por su teoría de la relatividad. Cuatro años más tarde, teóricos alemanes y de otros países europeos asombraron al mundo con la segunda revolución de la física, la mecánica cuántica. Los norteamericanos miraban con envidia tales logros obtenidos por quien fuera su enemigo y era su actual competidor: Alemania.

Aun cuando no parecía que ni la teoría de la relatividad ni la mecánica cuántica tuvieran una aplicación práctica espectacular, el prestigio internacional que las aureolaba superaba el de cualquier otra rama del saber. Los científicos alemanes eran muy conscientes de ello y en buena medida sirvió para reafirmar su orgullo nacional, hundido en la república de Weimar. Promovieron a los mejor dotados para que se doctorasen en física nuclear. En esa imagen buscaron espejarse los responsables de la ciencia norteamericana. Destacó en esa tarea el Consejo de Investigación Nacional (National Research Council, NRC) de la Academia Nacional de Ciencias, bajo la dirección de Robert A. Millikan y George Ellery Hale.

Con el apoyo financiero de la Fundación Rockefeller, el NRC desarrolló un programa de becas en el campo de la física atómica; se trataba de enviar jóvenes a Europa e invitar a los maestros europeos a enseñar en los Estados Unidos, como profesores visitantes o permanentes. En apenas diez años, de 1919 a 1930, la investigación norteamericana en física cuántica se encontraba ya alineada en primera fila con las grandes potencias intelectuales. En 1926, Max Born, docente temporal en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, informó al decano de Göttingen que había recibido dos ofertas de trabajo. “Mientras que en Estados Unidos la física experimental está en su esplendor, la teórica está subdesarrollada”, escribió. “Pero los norteamericanos están decididos a solucionar ese vacío con ayuda europea.”

De esa estrategia fue beneficiario directo Oppenheimer. Había nacido en el seno de una acomodada familia neoyorquina, judía. Tuvo otro hermano, Frank, físico también. Julius Robert ingresó en Harvard en 1922 y se licenció, *summa cum laude*, en química en 1925. Desde su adolescencia cultivó el gusto por las humanidades, con particular afición por la literatura francesa y la filosofía; estudió incluso los *Principia mathematica* con Whitehead. Con el mismo ahínco y determinación ahondaba en termodinámica, física cuántica y química física. En esa época juvenil sufrió intensos episodios de altibajos emocionales. Las depresiones iban a acompañarle largo tiempo.

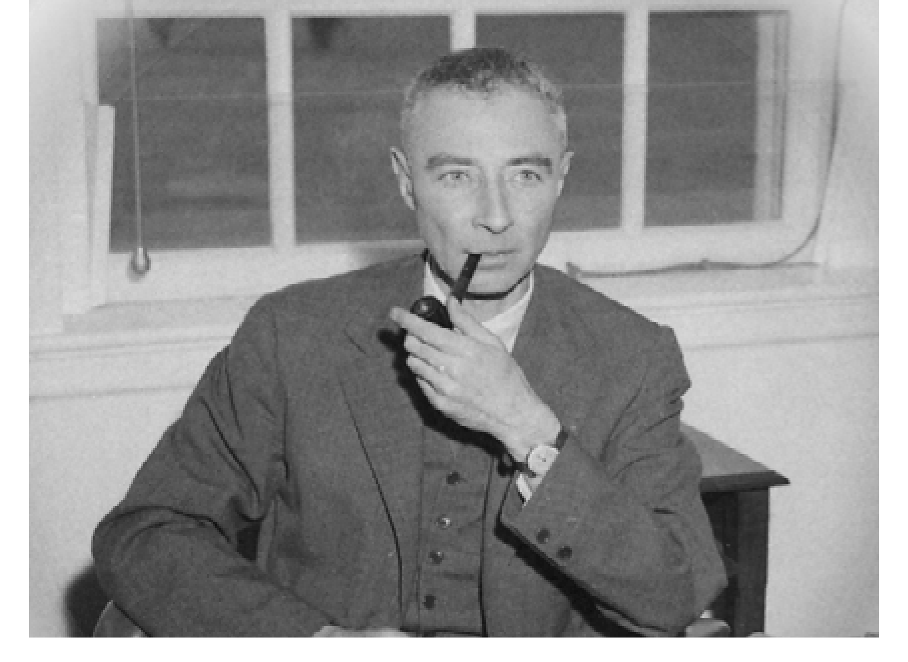
Tras graduarse en Harvard con Percy Bridgman, éste le convenció para que se pasara al campo de la física. Y ninguna mejor opción que el Cavendish de Cambridge para concentrarse en la mecánica cuántica. Allí desarrolló su formación en 1926 con Ralph Howard Fowler y Paul Dirac. Empezó a trabajar sobre aplicaciones del nuevo formalismo a problemas atómicos inveterados o no resueltos. Pasó luego a Göttingen con Max Born. Aquí recibió el doctorado en física teórica en 1927 con una tesis sobre la teoría cuántica de los espectros continuos. Su aprovechamiento quedó reflejado en la famosa aproximación Born-Oppenheimer de química cuántica.

Para mantener la actividad investigadora de los graduados en el extranjero, el NRC ofrecía bolsas posdoctorales. Oppenheimer contaba con la recomendación de Born, quien escribió al NRC: “Quiero señalar al único que está por encima de la media. Oppenheimer es extraordinariamente bueno en matemática, conoce bien la física y promete ser un académico

sobresaliente”. Con el apoyo de Karl T. Compton, adscrito a la dirección del NRC, Oppenheimer entró en el recién creado Instituto de Tecnología de California para colaborar con Paul Epstein, físico que Millikan, presidente del Caltech, se había traído de Múnich. En 1927 repartió su tiempo entre Harvard y el Caltech, dedicado a la aplicación de la mecánica cuántica a los electrones metálicos y a los espectros de emisión. Contaba 23 años y había recibido ya ofertas de al menos diez universidades, entre ellas dos de Europa.

No tenía prisa. En 1928 volvió a Europa, financiado por la Fundación Rockefeller. Esa segunda estancia resultaría sumamente provechosa. Trabajó con Fowler en Cambridge y con Ehrenfest en Leiden; asistió a las clases de Heisenberg en Leipzig sobre ferromagnetismo, donde coincidió con otro becario, Isidor I. Rabi. Y, sobre todo, estuvo con Wolfgang Pauli en el Politécnico Suizo de Zúrich, compartiendo estancia con Rudolf Peierls y Felix Bloch. Pudo así contribuir a la electrodinámica cuántica relativista entonces en construcción por Pauli y Heisenberg. De ambos teóricos europeos, de Pauli en particular, adquirió lo que les faltaba a los norteamericanos: madurez e imaginación. Estilo, que diría Rabí. En Zúrich inició un trabajo donde demostraba que la electrodinámica cuántica conducía a desplazamientos lineales en los espectros atómicos.

Un año después, en 1929, cuando Oppenheimer llegó al campus de Berkeley, la universidad cifró su esperanza en él y en el Laboratorio de Radiación de Ernest Lawrence para elevar el nivel de la física norteamericana. ¿En qué medida satisficieron Oppenheimer y su escuela tales esperanzas? Oppenheimer no era ni un profesor popular ni un burócrata excelente. Los alumnos evitaban inscribirse en su materia, según afirmaban, porque se les exigía en demasía y el desarrollo de las clases dejaba mucho que desear. Sólo 22 doctorados dirigió entre 1930 y 1943, siendo así que en el mismo período de 1930-39 el departamento produjo 70 doctorados. Aunque los discípulos más directos lo veneraban y logró una atmósfera cohesionada donde no se descuidaba la formación artística y humanística en general. De Cambridge se trajo



1. J. Robert Oppenheimer (1904-1967).

la idea de la reunión de los lunes, en que un *postdoc* exponía un tema para el debate.

Su investigación se extendió a la electrodinámica cuántica, rayos cósmicos, física nuclear y astrofísica, incluida la primera sugerencia teórica sobre la existencia de agujeros negros. Entre 1929 y 1943, Oppenheimer publicó 36 artículos de investigación y 16 resúmenes de conferencias. Salvo dos, todos esos trabajos aparecieron en *Physical Review*. Cuatro de esos artículos, en particular los dedicados a astrofísica, siguen citándose todavía. De esos 36 artículos, sólo 12 aparecieron con Oppenheimer como autor único. Los dos tercios restantes los firmó con sus discípulos; ocasionalmente con algún colega. Once de los 36 artículos de investigación abordaban fenómenos de colisión nuclear que derivaban de los ensayos realizados en el acelerador de Berkeley.

El interés de Oppenheimer en la física de los rayos cósmicos comenzó en 1931, como resultado de su asociación con los experimentos del Caltech. Ahondó en el poder de penetración de esos rayos en dos artículos, que escribió con Frank Carlson, sobre las propiedades de los electrones rápidos y los neutrones magnéticos (1931 y 1932). Calcularon la pérdida de ionización de electrones en las colisiones y la pérdida de los neutrones magnéticos, que se suponía presentaban un momento magnético equiparable al del protón. En 1933, determinó, con Milton Spinoza Plessett, la producción de un par electrón-positrón cerca del umbral y a altas energías.

Aunque de la cuantización del campo de ondas del electrón había comenzado a ocuparse en 1927, hasta 1934 no se sirvió de esa técnica para describir los sistemas electrón-positrón. Con Wendell Furry mostró que la teoría era simétrica en electrones y positrones. De acuerdo con la misma, podía producirse de forma transitoria un par electrón-positrón a partir del vacío; en el marco de esa teoría abordó también la radiación de aniquilación de positrones absorbidos en la materia. Un año antes, en 1933, había iniciado sus trabajos sobre física nuclear. Calculó la dependencia de energía de la reacción nuclear producida por el bombardeo de litio con protones. Su principal contribución en este dominio se fecha en 1935 con el llamado “proceso Oppenheimer-Phillips”, en el que un deuterón, al penetrar en un núcleo pesado, se desdobla en protón más neutrón, y una de esas partículas se retiene por el núcleo mientras que la otra vuelve a emitirse. Tras la guerra, este proceso devino una herramienta importante en el estudio de los niveles de energía nuclear y sus propiedades.

Con Robert Serber, su discípulo y ayudante más cercano, investigó sobre densidades de nivel nuclear a partir del modelo de la gota líquida de Bohr (un artículo con el intrigante título de “la desintegración de los protones de alta energía”, donde se subraya que, en las colisiones, los protones pueden transferir una fracción considerable de su energía a los

El legado de Kant

THE KANTIAN LEGACY IN NINETEENTH-CENTURY SCIENCE. Dirigido por Michael Friedman y Alfred Nordmann. The MIT Press; Cambridge, 2006.

Immanuel Kant (1724-1804) no sólo brilló con luz propia en el campo de la filosofía, sobre todo, en teoría del conocimiento y en ética. Memorables fueron también sus incursiones en el terreno de la ciencia. En 1755 propuso que la Vía Láctea era un conjunto lentiforme de estrellas y avanzó la hipótesis nebular sobre la formación del sistema solar (*Historia general de la naturaleza y teoría del cielo: un ensayo sobre la constitución y origen mecánico de todo el Universo creado, de acuerdo con los principios de Newton*), desarrollada más tarde esta última por Laplace. Equiparaba, pues, nebulosas y galaxias. Se mostró partidario de la acción a distancia sin necesidad de un medio transmisor y defendió la idea de que el rozamiento de las mareas retardaba la rotación terrestre. Estudiada intensamente hasta nuestros días la influencia de Kant en la filosofía subsiguiente, faltaba por sistematizar su legado científico. Hasta que Friedman y Normann se pusieron manos a la obra.

Parece fuera de duda la repercusión del pensamiento kantiano en la matemática. De hecho, constituye un lugar común que el desarrollo de la matemática moderna, la lógica matemática y los fundamentos de la matemática deban contemplarse en el marco de un curso evolutivo que procede de Kant a Hilbert. Ahora comienzan a aflorar otras influencias menos evidentes, así en física, en química y en biología. La investigación histórica reciente centra su atención principal en la obra kantiana *Principios metafísicos de la ciencia natural* (1786), que se publicó entre la primera (1781) y la segunda edición (1787) de la *Crítica de la razón pura*. Se detiene también en sus reflexiones ulteriores sobre la filosofía de la naturaleza: *Crítica del juicio* (1790) y *Opus postumum* (1796-1803). En esta labor póstuma se recogen bocetos y borradores de un tratado que iba a llevar por título *Transición de los principios metafísicos de la ciencia natural a la física*.

La filosofía de Kant sobre el conocimiento y la *empiría* se basa en varias distinciones fundamentales. Anterior a todas, la que establece entre la facultad de la sensibilidad y la facultad del entendimiento puro. Aquélla es la facultad receptiva, pasiva, de la intuición pura, que implica las formas puras de la intuición sensible (espacio y tiempo); la segunda es la facultad intelectual, activa, que implica las categorías o conceptos puros del entendimiento (substancia, causalidad, comunidad, etcétera). De esa distinción básica se origina la dicotomía entre apariencias (objetos espaciotemporales ofrecidos a nuestra sensibilidad) y objetos en sí mismos (objetos puramente intelectuales pensados sólo por el entendimiento), así como la distinción entre principios a priori *constitutivos* y principios a priori *reguladores*. (Kant distinguía entre razón y entendimiento; éste era la facultad intelectual aplicada a la sensibilidad, mientras que la razón era la misma facultad intelectual considerada independientemente de la sensibilidad.)

Los principios constitutivos resultan de la aplicación de representaciones puramente intelectuales a nuestra sensibilidad espaciotemporal. Producen las condiciones necesarias para todos los objetos de experiencia. Los conceptos puros —categorías de substancia, causalidad o comunidad— se realizan en nuestra experiencia por un sistema de entidades conservadas, causalmente interaccionantes y distribuidas en el espacio y el tiempo. Para Kant, el concepto de ser vivo quedaba fuera de la ciencia genuina, que sólo admitía la intervención de causas mecánicas en la explicación de los fenómenos de la naturaleza.

La facultad de la razón, en contradistinción con la facultad del entendimiento, genera representaciones intelectuales a priori que no podían realizarse plenamente en nuestra experiencia humana espaciotemporal. Tales representaciones incluyen la idea de Dios, inmortalidad y libertad, así como la idea de la unidad sistemática de todos los conceptos empíricos y principios bajo los conceptos a priori constitutivos y los principios ya generados por el entendimiento. Esta idea de unidad sistemática guía nuestro proceso de investigación en las ciencias empíricas e inductivas, a medida que ascendemos desde los principios y conceptos empíricos de nivel inferior hasta los principios y conceptos de nivel superior. El objetivo de este proceso es una ciencia empírica completa ideal de la naturaleza en la que todos los conceptos y principios empíricos se hallan constitutivamente fundados en los principios y categorías puras del entendimiento. Se trata, no obstante, de un ideal que nunca se alcanza por completo.

En el período entre los *Principios metafísicos* y la primera *Crítica*, Kant aplica el uso regulador de la razón a la química contemporánea. Hablamos de una química prelavoisieriana, la del flogisto de Stahl reforzada con los nuevos descubrimientos en pneumática. Para el filósofo se trata de un arte puramente

positrones más neutrinos), acometió una revisión del fotoefecto nuclear a alta energía, calculó los efectos drásticos de resonancia en las transmutaciones de núcleos ligeros y analizó las reacciones del boro más protón, en el que se da el primer ejemplo de una regla de selección de espín isotópico. En 1937 Niels Bohr acudió a Berkeley para dictar una conferencia en torno al modelo del núcleo llamado de la gota líquida, base de la teoría de la fisión nuclear de Bohr-Wheeler. A mediados de ese mismo año Oppenheimer y Serber avanzaban primeros datos sobre los mesones, partículas postuladas por Hidei Yukawa para explicar las fuerzas nucleares. Seguirían en esa línea de trabajo. En 1940-41, se produjo el modelo de Oppenheimer y Julian Schwinger sobre teoría del acoplamiento fuerte para mesones escalares cargados y mesones pseudoescalares neutros, donde calculaban las secciones eficaces de la dispersión y predecían las isobaras de los nucleones.

En el otoño de 1938, abordó el destino de las estrellas masivas que habían agotado sus reservas termonucleares. Dando por supuesto que una estrella dotada de gran masa que las hubiera agotado colapsaría formando una estrella de neutrones, Oppenheimer investigó si la masa de esa estrella, en el supuesto de que fuera estable, tenía un límite superior; y si lo tenía, cuál sería. Apoyándose en la teoría de la relatividad general, estableció con Volkoff una ecuación aproximada y, en su conclusión final, determinaron que, aunque las estrellas viejas pudieran terminar su vida constituidas en estrellas estables de neutrones, rara vez lo hacían. Creían que el destino habitual de las estrellas masivas era el de una contracción incesante. Su límite de existencia (límite de Oppenheimer-Volkoff) sería de unas tres masas solares.

En otro artículo con Hartland Snyder se centró en estrellas que no perdían masa suficiente para convertirse en enanas blancas, en el caso ideal de una estrella dotada de gran masa sin presión radial positiva. En sus conclusiones, Snyder y Oppenheimer

experimental, empírico, guiado por el uso regulador de la razón hacia un estado futuro inespecífico e indeterminado: un arte quizá sistemático, pero no una ciencia propiamente dicha. En la *Crítica del juicio*, extiende la doctrina del uso regulador de la razón a la facultad del juicio reflexivo, en particular aplicado a la biología. La biología, el estudio de la vida, no podrá ser nunca una ciencia en sentido estricto para Kant: no podrá estar nunca constitutivamente basada en las fuerzas fundamentales de la materia. Lo mejor que podemos hacer, propone, es extender la doctrina del uso regulador de la razón a través de la idea de finalidad.

En los *Principios metafísicos* Kant tenía muy poco que decir sobre la variedad específica de la materia, aunque presenta un esquema de su concepción sobre los fundamentos de la química contemporánea, donde se incluían las nociones de cohesión, fluidez, elasticidad y disolución, debatidas entonces. Hacia 1795, sin embargo, Kant ha terminado la transición de la química del flogisto de Stahl a la nueva química de Lavoisier, y se muestra ahora convencido, contrariamente a la doctrina que mantenía en *Principios metafísicos*, de que la química ha entrado por fin en el camino seguro de la ciencia.

En su teoría dinámica Kant describe la materia como constituida a partir de las "fuerzas fundamentales" de atracción y repulsión, más que de un sólido primitivo, originalmente duro e impenetrable. Esa teoría influyó de manera determinante en Friedrich Schelling, Karl Adolf Eschenmayer, Heinrich Link y Alexander Scherer, representantes eximios de la *Naturphilosophie* que aplicaron esa doctrina a la nueva química de Lavoisier y a los descubrimientos en electricidad y magnetismo. Una dependencia que no fue óbice para que el idealismo alemán —según se iría articulando sucesivamente por Fichte, Schelling y Hegel— se caracterizara por un rechazo de las distinciones fundamentales de Kant, en particular la distinción entre apariencias y cosas en sí, entre principios constitutivos y principios reguladores. La *Naturphilosophie* nació, en efecto, de una profunda *aporeia* en el sistema kantiano, es decir, de su incapacidad para explicar la interacción entre lo intelectual y lo sensible, el noúmeno y el fenómeno.

Pero los *Naturphilosophen* románticos —Schelling, Hegel, Schlegel y Novalis— concedían a la naturaleza el estatuto de organismo, una declaración del peor tipo de metafísica dogmática, en palabras de los neokantianos. Además, Albrecht von Haller, Johann Friedrich Blumenbach, Christian Friedrich Kielmeyer, Kaspar Friedrih Wolff, Alexander von Humboldt concebían las fuerzas vitales como agentes causales, no como principios reguladores. Más coherente con el kantismo fue, sin embargo, el electromagnetismo de Oersted: la teoría dinámica de la materia abría la posibilidad de un tratamiento unificado de todas las fuerzas de la naturaleza, en especial las fuerzas eléctricas y magnéticas.


Immanuel Kant (1724-1804)

Más adelante, el movimiento de vuelta a Kant se manifiesta en una vertiente científica, protagonizada por Hermann Helmholtz, y una vertiente filosófica, liderada por Cohen y la escuela de Marburgo. Helmholtz desarrolló una epistemología neokantiana en conexión con su investigación en psicofisiología de la percepción por los sentidos, íntimamente asociada, a su vez, con su trabajo sobre la conservación de la energía y los fundamentos de la geometría. En efecto, el interés de Helmholtz por los fundamentos de la geometría surgió de sus estudios sobre la percepción espacial. El advenimiento de la geometría no-euclideana ha sido siempre considerado como uno de los retos fundamentales contra la teoría de la intuición espacial. Si son posibles las geometrías no-euclídeas, entonces cabe cuestionarse que los postulados de Euclides gocen de las propiedades de necesidad y universalidad que Kant les reconocía en cuanto aspectos de la forma de intuición externa.

Aunque no podemos vincular a Poincaré con el neokantismo estricto, se alinea en esa corriente cuando defiende que los principios fundamentales del razonamiento matemático, en particular la inducción, eran sintéticos a priori, no puramente lógicos (enfrentándose así a la nueva lógica matemática representada por Frege y Russell). Pese a que su filosofía "convencionalista" le separa de la tesis kantiana de una geometría euclídea que era sintética a priori, Poincaré adoptaba una concepción más intuitiva de la geometría que la concepción "formalista" ahora asociada con la obra de Hilbert.

—L. A.

declaraban que las estrellas reales entrarían en colapso con lentitud mayor que sus estrellas ideales en razón del efecto de la presión, de la materia y de la radiación, y de la rotación. Los dos artículos de Oppenheimer sobre colapso estelar aparecieron, respectivamente, en febrero y en septiembre de 1939; se consideran sus dos trabajos de investigación más impresionantes y el firmado con Snyder, como uno de los monumentos de la física del siglo XX.

El 6 de enero de 1939 Otto Hahn y Fritz Strassmann anunciaban un descubrimiento inquietante. Entre los subproductos de las colisiones entre neutrones y uranio habían identificado tres isótopos de bario, que tenía una carga nuclear aproximadamente la mitad del uranio. Hasta entonces, las reacciones nucleares no habían producido nunca cambios en la carga nuclear por encima de las dos unidades. Fue la primera observación de la fisión nuclear. Cuando la fisión nuclear saltó a escena, en 1939, las posibilidades científicas eran excitantes, las políticas, amenazantes. En 1939 Oppenheimer llegó a la conclusión de que podía provocarse una reacción en cadena autosostenida. En 1941 Lawrence comenzó a trabajar en Berkeley sobre la separación del uranio 235; Oppenheimer y su grupo colaboraron directamente con él. Tras una brillante exposición sobre la física de la bomba en el marco de la teoría de la fisión, Arthur Compton nombró a Oppenheimer cabeza del equipo de teoría de neutrones rápidos en Berkeley, a instancias de Lawrence.

Para entonces, Oppenheimer había congregado a su alrededor y formado una masa crítica de jóvenes teóricos en Berkeley y en el Caltech que formarían el núcleo de lo que habría de ser el Proyecto Manhattan. Durante el verano de 1942, Oppenheimer reunió en secreto a un pequeño grupo en su oficina de Le Conte Hall para explorar las posibilidades de un ingenio atómico: necesitaba comparar los cálculos teóricos sobre la operación de una bomba de fisión con los datos conocidos sobre el núcleo. Los nueve participantes representaban todos los



3. Bohr, MacMillan y Oppenheimer en el CERN de Ginebra, en 1960.

ámbitos de la física teórica norteamericana: dos eran norteamericanos de origen, Oppenheimer y John Van Vleck; cuatro, Hans Bethe, Edward Teller, Felix Bloch y Emil Konopinski, inmigrantes europeos; y tres, miembros de la escuela de Oppenheimer, Serber, Eldred Nelson y Stanley Frankel. El equipo de Oppenheimer analizó exhaustivamente cada fase del desarrollo de la bomba: masa crítica de uranio y plutonio necesaria para soportar una reacción explosiva en cadena, velocidad que debe alcanzar la masa subcrítica para activar cualquier tipo de bomba, tamaño y peso de las bombas reales y energía de destrucción liberada.

En septiembre de 1942 se creó el proyecto Manhattan para fabricar la bomba bajo la dirección científica de Oppenheimer y dependiente de la supervisión militar del general Leslie Groves. Oppenheimer sugirió a Groves que el proyecto se centralizara en un nuevo laboratorio, para guardar el secreto y alejado de las vías de comunicación. El lugar escogido fue Los Alamos de Nuevo México. En junio de 1945, se produjo allí la explosión de la primera arma nuclear, ensayo conocido bajo la palabra cifrada "Trinidad". Aunque Oppenheimer y algunos científicos que asistieron al ensayo mostraron su inquietud por las implicaciones de lo creado, Oppenheimer y los otros directores del proyecto mostraron su apoyo al lanzamiento en Hiroshima y Nagasaki el 6 y 9 de agosto de 1945, respectivamente.

La depresión y el ascenso de los fascismos en los años treinta despertaron sus simpatías por la causa comunista y el bando republicano durante nuestra guerra civil. Una moda compartida por su círculo más íntimo. ¿Se afilió a la célula comunista de su universidad? Se duda que hubiera tal formalidad, pero nadie pone hoy en entredicho su constante apoyo y compromiso militante.

La victoria aliada lo elevó al olimpo de los semidioses. Se le abrieron los despachos del poder. En su aureola de prestigio arrastró a la física. Pero al mismo tiempo comenzaron sus dudas y sentimientos de culpa. "Los físicos hemos conocido el pecado", confesó. Y empezó a reclamar la cooperación internacional para asegurar la supervivencia de la humanidad tras Hiroshima. Puso su firma en el informe Acheson-Lilienthal que proponía una autoridad mundial sobre el desarrollo atómico.

En 1947, cuando el Proyecto Manhattan militar se transformó en la Comisión para la Energía Atómica civil, se le nombró miembro y presidente de su núcleo asesor. Ese mismo año, se trasladó de California a Princeton, para hacerse cargo de la dirección del Instituto de Estudios Avanzados. Pero los acontecimientos tomaron un curso torvo, en particular, tras el ensayo soviético de su primer ingenio nuclear en 1949. Oppenheimer se mostraba escéptico sobre las posibilidades reales de la URSS en el campo nuclear. Y en el debate sobre la fabricación de la bomba de hidrógeno en 1949-50 se puso del lado de los que se oponían al desarrollo de una nueva arma. Entre los defensores se encontraban los físicos Edward Teller y Ernest Lawrence, políticos influyentes y, en particular, el Ejército del Aire. La "Súper", así se llamaba, multiplicaría el poder destructor de la bomba atómica. Oppenheimer era partidario de almacenar pequeñas armas nucleares. La discusión terminó cuando en 1950 Truman ordenó el desarrollo de un programa termonuclear. En los años siguientes, Oppenheimer continuó con la defensa de su postura de moderación, con una elocuencia persuasiva y lenguaje afilado. Postura incómoda e insegura cuando empezó a subir la marea maccarthyista.

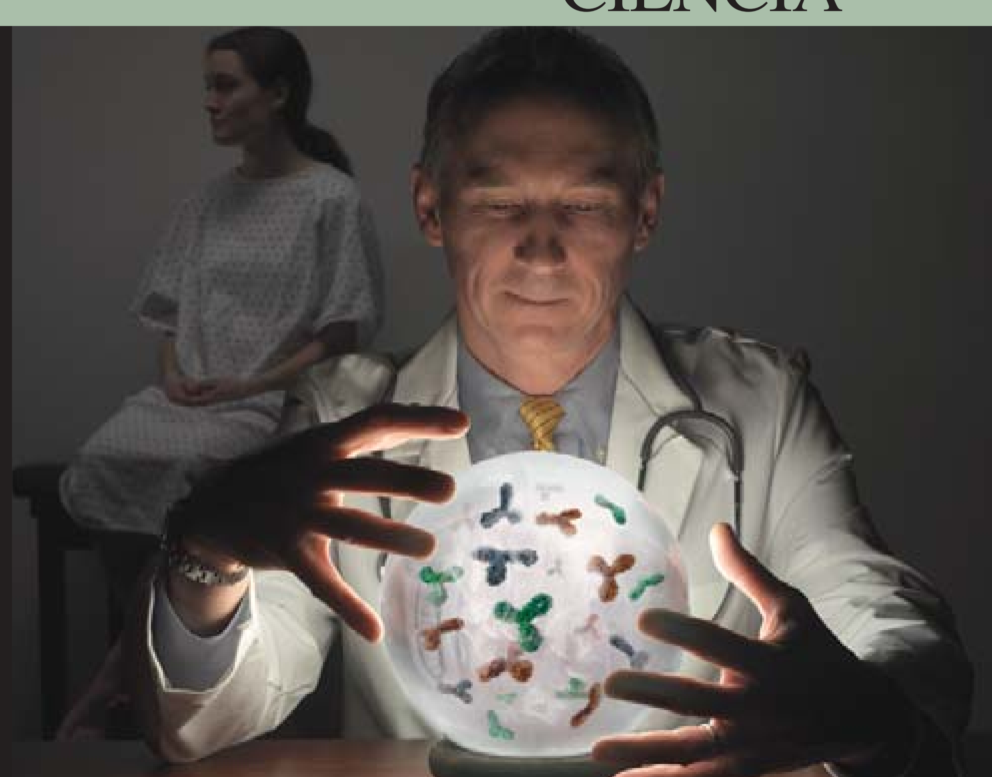
Se le recriminaba su ambición. El pasado izquierdista le hizo vulnerable. Ningún otro consejero presidencial presentaba semejante lastre. El contraespionaje militar, que le había vigilado durante la guerra, registró un encuentro ambiguo con Haakon Chevalier, de la célula comunista de Berkeley. ¿Tenía interés la Unión Soviética en lo que sucedía en Los Alamos? Con los años el FBI fue aumentando su expediente. El Comité de Actividades Antinorteamericanas decidió en 1954 abrir a Oppenheimer una causa criminal por delito de espionaje. En junio de ese año se le destituyó de todos sus cargos. Pero él siempre defendió su lealtad al país.

Gregg Herken sostiene que Robert Oppenheimer y Haakon Chevalier habían sido miembros de una unidad secreta de la sección profesional del Partido Comunista en Berkeley, entre los años 1938 y 1942. En la investigación posterior comprobó que de la declaración de Chevalier en que confesaba su pertenencia a esa célula comunista junto con Oppenheimer y de la negación de éste de que perteneciera, Chevalier decía la verdad, pero no Oppenheimer. La investigación histórica ha confirmado que la pertenencia no iba acompañada siempre de la titularidad de un carné ni de un recibo de pagar las cuotas. Tras la apertura de los archivos del KGB algunos historiadores han tildado a Oppenheimer no sólo de comunista, sino de traidor. Herken no ve en esos papeles fuerza suficiente para afirmar que espiara para la Unión Soviética.

Es incontrovertible que entregó importantes sumas a actividades y causas defendidas por el socialismo. Sus amigos adujeron en su defensa que Oppenheimer empezó a cambiar en 1938, cuando los periódicos estadounidenses airearon la ola de terror y purgas estalinistas. En 1963 recibió una rehabilitación implícita cuando el presidente Johnson le concedió el premio Fermi. Oppenheimer murió de cáncer el 18 de febrero de 1967.

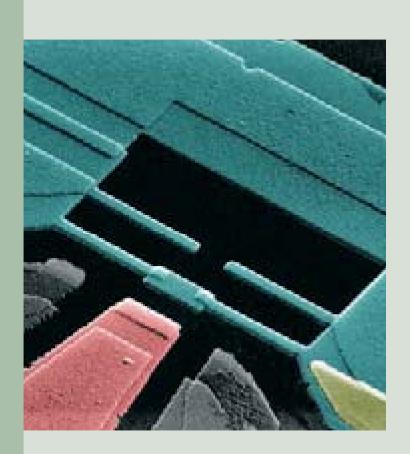
—Luis Alonso





PREDICCION DE ENFERMEDADES, por Abner Louis Notkins

Existen autoanticuerpos que predicen las enfermedades que aparecen en la sangre años antes de que se manifiesten los síntomas. La detección de esas moléculas alertaría de la necesidad de adoptar medidas preventivas.



EFECTO TUNEL EN SUPERCONDUCTORES, por Roberto Escudero

La técnica espectroscópica por excelencia para estudiar el estado superconductor se basa en el efecto túnel. Toda la información relevante sobre las interacciones elementales que dan lugar al condensado superconductor, así como la termodinámica del estado normal, se obtienen mediante esta herramienta.



DESMANTELAMIENTO DE PRESAS, por Jane C. Marks

Con el desmantelamiento de presas se recuperan ríos y los ecosistemas que éstos sustentan. Pero también rebrotan riesgos que podrían prevenirse.

DIESEL VERDE, por Steven Ashley

El uso de motores más perfectos y escapes más depurados, junto con un nuevo combustible, logrará coches diésel de alto rendimiento y casi tan limpios como los híbridos.

LA REACCION DE LOS AGUJEROS NEGROS, por Wallace Tucker, Harvey Tananbaum y Andrew Fabian

Un agujero negro, menor que el sistema solar, controla el destino de un cúmulo entero de galaxias.

